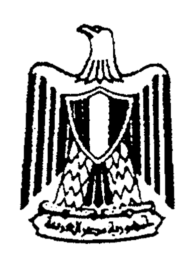


جمهورية مصر العربية
وزارة الموارد المائية والرى
المركز القومى لبحوث المياه

الكود المصرى
للموارد المائية وأعمال الرى

المجلد الرابع

المنشآت المدنية للرى والصرف

(الجزء الثانى)

اللجنة الدائمة

لإعداد الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

الطبعة الأولى
عام ٢٠٠٣

تقديم

لما كان الماء هو عصب الحياة وركيزة تقدم الشعوب وأنه ندرة فى منطقتنا العربية ويتزايد الطلب عليه يوماً بعد يوم فقد وجب علينا أن نرفع دوماً من كفاءة إدارته لنعظم عوائده ونحد من فواقده.

لذلك رأت وزارة الموارد المائية والرى إعداد هذا الكود ليكون دستوراً للعمل ودليلاً يهتدى به ويحتكم إليه. ولقد راعت الوزارة فى إعداده أن يضم نظماً موحدة لإدارة شبكات الرى والصرف وتنفيذ مشروعاتها، وأن يكون شاملاً لأعمال حماية وتنمية السواحل البحرية، وأن يتضمن تحديداً لأساليب الإختبار والمعايير القياسية الخاصة بتصميم وتنفيذ الأعمال وإختبار مواد الإنشاء فضلاً عن تضمينه ضوابط لأحكام الرقابة على كافة الأعمال الإنشائية، وعلى أعمال إدارة شبكات الرى والصرف، والأعمال الميكانيكية والكهربية، وأعمال حماية الشواطئ، وفى نفس الوقت يشكل مرجعاً يحتكم إليه فى حسم أى خلافات قد تنشأ بين أجهزة الوزارة والمتعاملين معها من وزارات وهيئات وأفراد. وأن يكون عاملا للحد من الأخطار حماية للمجتمع وللعاملين فى هذا المجال.

وقد شارك فى إعداد هذا الكود نحو ثمانين متخصصاً من الأساتذة وكبار المهندسين من ذوى الخبرات الطويلة المشهود لهم فى مجال أعمال الوزارة سواء من داخلها أو من الجامعات المصرية المختلفة. ولقد تحرينا قبل إصدار هذا الكود أقصى درجات التدقيق كما تم طرحه على مجتمع مستخدمى المياه وعلى مختلف القطاعات العاملة فى المجالات ذات الصلة بموضوعاته طلباً لمشورتهم ومقترحاتهم فى مضمونه، وتم الإسترشاد بما تلقيناه منهم جميعاً من مقترحات بناءة ومفيدة.

ونأمل أن يساهم هذا الكود فى رفع مستوى الأداء لتعظيم الفائدة من مواردنا المائية.

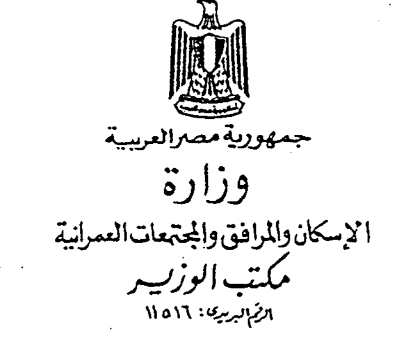
والله نسأل أن يلهمنا جميعاً سواء السبيل وأن يرشدنا لما فيه الخير لأمتنا ولوطننا العزيز.

وبالله التوفيق.

وزير الموارد المائية والرى

أستاذ دكتور مهندس / محمود عبدالحليم أبو زيد

بسم الله الرحمن الرحيم



قرار وزاري

رقم (٣٥٠) لسنة ٢٠٠٣

في شان

وضع أسس التصميم وشروط

التنفيذ بالنسبة لأعمال الموارد المائية ومتطلبات الري والصرف

وزير الإسكان والمرافق والمجتمعات العمرانية

- بعد الاطلاع على القانون رقم (٦) لسنة ١٩٦٤ بشأن أسس تصميم وشروط تنفيذ الأعمال الإنشائية وأعمال البناء .
- وعلي القرار الوزاري رقم ١٤٨ لسنة ١٩٩١ الصادر من وزير الأشغال العامة والموارد المائية بخصوص تشكيل اللجنة العليا للتنسيق بشأن إعداد الكود المصري في مجال أنشطة وزارة الأشغال العامة والموارد المائية.
- وعلي القرار الوزاري رقم ٢٨٥ لسنة ١٩٩١ الصادر من وزير الأشغال العامة والموارد المائية بشأن تشكيل اللجان الفرعية المختصة بإعداد بنود الكود المصري لأعمال الموارد المائية ومتطلبات الري والصرف .
- وعلي القرار الوزاري رقم ٣١٧ لسنة ١٩٩٣ الصادر من وزير الأشغال العامة والموارد المائية بشأن تشكيل اللجنة الفرعية التخصصية لأعداد بنود الكود المصري في مجال حماية الشواطئ .
- وعلي القرار الوزاري ي رقم ٢٣٨ لسنة ١٩٩٤ الصادر من وزير الأشغال العامة والموارد المائية المتضمن تشكيل اللجنة الدائمة للكود المصري لأعمال الموارد المائية ومتطلبات الري والصرف .
- وعلي كتاب السيد الدكتور وزير الموارد المائية والري .

بسم الله الرحمن الرحيم



وزارة
الإسكان والمرافق والمجتمعات العمرانية
مكتب الوزير
الرقم البريدي : ١١٥١٦

قــــرار

مادة (١): يتم العمل بأسس تصميم وشروط تنفيذ جميع أعمال الموارد المائية ومتطلبات الرى والصرف والمرفقه بهذا القرار.

مادة (٢): تلتزم الجهات المعنيه والمذكورة فى القانون رقم ٦ لسنة ١٩٦٤ بتنفيذ ماجاء بهذا القرار.

مادة (٣): تتولى اللجنة الدائمة المشكلة لهذا الغرض بوزارة الموارد المائية والرى إقتراح التعديلات التى تراها لازمة بهدف التحديث كلما دعت الحاجة لذلك .. وتعتبر التعديلات بعد إصدارها جزءاً لايتجزأ منه.

مادة (٤): تتولى وزارة الموارد المائية والرى نشر ماجاء بهذه الأسس والتعريف بها والتدريب عليها.

مادة (٥): ينشر هذا القرار فى الوقائع المصرية ويعتبر نافذاً من تاريخ النشر.

صدر فى ٢/١٢/٢٠٠٣

وزير الإسكان والمرافق
والمجتمعات العمرانية

(م/ محمد ابراهيم سليمان)

شكر وعرفان

بسم الله الرحمن الرحيم

"وقالوا الحمد لله الذى هدانا لهذا وما كنا لنهتدى لولا أن هدانا الله ".

صدق الله العظيم

بإتمام هذا العمل الكبير الذى بدأته نخبة متميزة من العلماء الأجلاء ومن كبار مهندسى الرى المصرى منذ ما يـــربو على العشر سنوات تواكبت فيها جهودهم الخالصة مع فكرهم الخلاق وفى إطار من التفانى والمثابرة والتصـــميم ليضـــعوا الأسس والمعايير للأجيال القادمة لتنظيم ولضبط ولترشيد إستخدام المياه ... تكون هذه النخـــبة قد خطت بمصرنا إلى عهد جديد يتسم بتأصيل المعرفة فى التعامل مع أهم مورد فى الحياه حبانا به الله . فلهم كل الشكر والثناء على ما قدموه لوطنهم من عطاء ، والله على حسن مثوبتهم لقدير .

وبمـــا أن الفضل يجب أن يرد إلى صانعيه .. فيتوجب علينا أن نذكر بكل العرفان والتقدير كل من آزروا هذا العمـــل وهـــيأوا له سبل الإنجاز . فما كان لهذا العمل أن يبدأ دون إشارة البدء التى أطلقها السيد المهندس الكبـــير الوزيـــر/ عصام عبدالحميد راضى الذى سارع بالإستجابة وبتوفير كافة الإمكانات له وبذلك إستحق وبكـــل الحـــق فضـــل ريادة هذا العمل .. كذلك كان للزميل العزيز الأستاذ الدكتور الوزير / محمد عبدالهادى راضـــى طيـــب الله ثـــراه مآثـــره ، فلقد كان لجهده وفكره الثاقب أعظم الأثر فى التخطيط البناء له وذلك عـــندما شـــغل عضوية أول تشكيل للجنة تنسيق الكود كما كان لرعايته الدائمة له عندما تقلد منصب رئاسة وزارة الأشـــغال العامة والموارد المائية أبعد الأثر لدفع العمل لأعلى المستويات ... وأخيراً وليس آخراً لا بد أن ننوه بالدعم الكبير الذى قدمه ويقدمه الأستاذ الدكتور الوزير/ محمود عبدالحليم أبو زيد الذى قيد الله أن يتم فضله وأن تتم الطبعة الأولى لكود الموارد المائية وأعمال الرى بحسن توجيهه وبفضل إرشاده .

وقل إعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون .

"ربنا لا تزغ قلوبنا بعد إذ هديتنا" "ربنا هيئ لنا من أمرنا رشدا"

يونيو ٢٠٠٣

مقرر لجنة تنسيق

الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

أ.د/ أحمد عبدالوهاب خفاجى

أسماء السادة المشاركين فى إعداد
الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

أعد هذا الكود بمعرفة اللجان التالية:

أولاً: اللجنة الدائمة للكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

ثانياً: لجنة تنسيق الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

ثالثاً: اللجان التخصصية وهى:

١. لجنة إدارة شبكات الرى والصرف
٢. لجنة المنشآت المدنية للرى والصرف
٣. لجنة الأعمال الميكانيكية والكهربائية للرى والصرف
٤. لجنة تقنيات حماية الشواطئ البحرية

** وقد تشكلت اللجنة الدائمة برئاسة السيد الدكتور الوزير واشترك فى عضويتها منذ بدء تشكيلها للمرة الأولى وحتى تشكيلها الحالى - السادة الأتية أسماؤهم طبقا للترتيب الأبجدى وهم:

أ.د/ أحمد عبد الوهاب خفاجى	مقرراً
أ.د/ أحمد فخرى خطاب	
م/ احمد جابر بركات	
م/ أنور محمد حجازى	
م/ حسين سعيد علوان	
أ.د/ سعد ابراهيم الخوالقة	
أ.د/ شارل شكرى سكلا	
أ.د/ طلعت محمد عويس	
أ.د/ عبد الرحمن صادق بازرعة	
أ.د/ عبد الرحمن حلمى الرملى	مقرراً
م/ عبد الغنى حسن السيد	
أ.د/ محمد بهاء الدين أحمد	
أ.د/ محمد فائق عبد ربه	
أ.د/ محمد مصطفى عطعوط	
م/ محمود سعد الدين الجندى	
أ.د/ مصطفى توفيق جاويش	
م/ مصطفى محمود القاضى	
أ.د/ منى مصطفى القاضى	
م/ نبيل فوزى ناشد	
أ.د/ نزيه أسعد يونان	

** شغل عضوية لجنة التنسيق منذ بدء تكوينها وحتى تشكيلها الحالى كل من السادة الآتية أسماؤهم طبقا للترتيب الأبجدى:

أ.د/ أحمد عبد الوهاب خفاجى	مقرراً
أ.د/ أحمد فخرى خطاب	
أ.د/ عبد المعطى حسن هيكل	
أ.د/ محمد رفيق عبد البارى	
أ.د/ محمد عبد الهادى راضى	
أ.د/ مصطفى توفيق جاويش	
د.م/ محمد إسماعيل أبو خشبة	(أمانة فنية)
د.م/ ياسر عبد العزيز الحاكم	(أمانة فنية)

أسماء السادة المشاركين فى إعداد المجلدين الثالث والرابع

** ساهم فى إعداد المادة العلمية لهذين المجلدين وحققها وراجعها وصاغها كل من السادة الآتية أسماؤهم – طبقاً للترتيب الأبجدى:

أ.د/ أحمد فخرى خطاب
م/ توفيق على ابراهيم عيد
أ.د/ جمال صادق عبيد
م/ حسين أحمد عبد الحليم لاشين
م/ حسن حسين شومان
أ.د/ حسن على ابراهيم
أ.د/ سعد ابراهيم الخوالقه
أ.د/ عبد الرحمن صادق بازرعة
أ.د/ عبد الله صادق بازرعة
أ.د/ على محمد طلعت
أ.د/ كمال حفنى حسن
أ.د/ محمد بهاء الدين أحمد
أ.د/ محمد حمدى الكاتب
د/ محمد عادل أحمد عبد المجيد
أ.د/ محمد عبد الوهاب عامر
أ.د/ محمد محمود جاسر
أ.د/ محمد نيازى حماد
م/ محمود سعد الدين الجندى مقرراً
م/ محمود محمد على
أ.د/ مصطفى توفيق جاويش
أ.د/ مصطفى كامل متولى زيدان
م/ مصطفى محمد عتيبة
م/ ميشيل حكيم السعيد
م/ نجيب فهمى سعيد
أ.د/ نزيه أسعد يونان
م/ وليم كامل شنودة

الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى

يقع الكود المصرى للموارد المائية وأعمال الرى فى سبعة مجلدات هى على النحو التالى:

المجلد الأول : إدارة شبكات الرى والصرف (الجزء الأول) ويشمل:

مقدمة	: تقديم لمرفق الرى و الصرف، وأجهزة الوزارة، ومسئولياتها
الباب الأول	: رى الأراضي الزراعية
الباب الثانى	: صرف الأراضى الزراعية

المجلد الثانى : إدارة شبكات الرى والصرف (الجزء الثانى) ويشمل:

الباب الثالث	: التوسع الأفقى
الباب الرابع	: تنمية الموارد المائية
الباب الخامس	: أعمال الصيانة
الباب السادس	: إدارة هيدرولوجيا السيول
الباب السابع	: الأعمال المساحية

المجلد الثالث : المنشآت المدنية للرى والصرف (الجزء الأول) ويشمل:

الباب الأول	: شبكات الرى المبطنة
الباب الثانى	: المنشآت المائية المتقاطعة
الباب الثالث	: المفيضات والمصبات
الباب الرابع	: الهدارات
الباب الخامس	: القناطر والبوابات
الباب السادس	: السدود
الباب السابع	: الأهوسة الملاحية
الباب الثامن	: محطات توليد القوى الكهرومائية

المجلد الرابع : المنشآت المدنية للرى والصرف (الجزء الثانى) ويشمل :

الباب التاسع : محطات الطلمبات
الباب العاشر : الآبار
الباب الحادى عشر : الكبارى
الباب الثانى عشر : الأنفاق
ملحق م١ : خرسانة المنشآت المائية

المجلد الخامس : الأعمال الميكانيكية للرى والصرف ويشمل:

الباب الأول : المضخات
الباب الثانى : محركات الإحتراق الداخلى
الباب الثالث : معدات نقل الحركة والقدرة
الباب الرابع : المحابس والبوابات
الباب الخامس : الوقاية الميكانيكية والكيماوية والحماية الكاثودية
الباب السادس : اختبار واختيار المواد
الباب السابع : المعدات الميكانيكية لصيانة المجارى المائية
الباب الثامن : معدات الرى المتطور
الباب التاسع : معدات مراقبة نوعية المياه فى المجارى المائية

المجلد السادس : الأعمال الكهربائية للرى والصرف ويشمل:

الباب الأول : المحركات الكهربية
الباب الثانى : المحولات الكهربية وملحقاتها
الباب الثالث : المفاتيح وتركيبات التوصيلات الكهربائية والوقاية الكهربائية
الباب الرابع : دوائر وأجهزة التحكم فى المحركات الكهربية
الباب الخامس : شروط تنفيذ الأعمال الكهربية
الباب السادس : منظومات طوارىء التغذية الكهربية
الباب السابع : التأريض
الباب الثامن : معدات الرى التى تعمل بالكهرباء

المجلد السابع: تقنيات حماية الشواطىء البحرية ويشمل:

الباب الأول : العوامل الطبيعية المؤثرة على المنطقة الساحلية والشاطئية

الباب الثانى : البحوث والدراسات الحقلية وأعمال النماذج الهيدروليكية الطبيعية والرياضية

الباب الثالث : تخطيط منشآت حماية الشواطئ وتأثيرها على المنطقة الشاطئية

الباب الرابع : تصميم منشآت الحماية

الباب الخامس : منشآت حماية الشواطئ وصيانتها

فهرس المجلد الثالث
المنشآت المدنية للرى والصرف (الجزء الأول)

الباب الأول : شبكات الرى المبطنة Lined Irrigation Network

الباب الثانى: المنشآت المائية المتقاطعة Water Crossing Structures

الباب الثالث : المفيضات والمصبات Escapes and Outlets

الباب الرابع : الهدارات Weirs

الباب الخامس: القناطر والبوابات Regulators and Gates

الباب السادس: السدود Dams

الباب السابع: الأهوسة الملاحية Navigation Locks

الباب الثامن: محطات توليد القوى الكهرومائية Hydraulic Power Plants

فهرس المجلد الرابع
المنشآت المدنية للرى والصرف (الجزء الثانى)

الباب التاسع محطات الطلمبات Pump Stations

الباب العاشر الآبار **Wells**

الباب الحادى عشر الكبارى Bridges

الباب الثانى عشر الأنفاق Tunnels

الباب التاسع
محطات الطلمبات Pump Stations

٩-١ المجال
تعمل محطات الطلمبات على رفع المياه بالتصرفات المطلوبة من المناسيب المنخفضة إلى المناسيب الأعلى وذلك إما بالرفع مباشرة فى نفس الموقع أو بدفع المياه داخل مواسير تحت ضغط إلى المناسيب العالية المرتفعة المطلوبة لإستخدامها فى أغراض رى الأراضى الزراعية ذات الكنتور المرتفع أو لصرف مياه المصارف العمومية برفعها وصرفها إلى البحر أو البحيرات أو المصارف الأكبر درجة.

٩-٢ أنواع محطات الطلمبات

٩-٢-١ الطلمبات المائلة

٩-٢-١-١ الطلمبات المائلة داخل عنبر الطلمبات Indoor Pumps
هذا النوع من محطات الطلمبات يتم تنفيذه بحيث تكون مواسير المص وإتصالها بمواسير الطرد بداخل عنبر الطلمبات وعلى بلاطة خرسانية مائلة بدرجة (٤٥°) تثبت عليها الموتورات الكهربائية لتشغيل الطلمبات المركبة على مواسير السحب لكل وحدة من وحدات المحطة.

٩-٢-١-٢ الطلمبات المائلة بدون عنبر الطلمبات Outdoor Pumps
هذا النوع من الطلمبات عبارة عن ماسورة مائلة للسحب تركب بداخلها مروحة الطلمبة ويتم تثبيت ماسورة السحب على بلاطة مائلة بدرجة (٤٥°) من الخرسانة العادية أو المسلحة تعلوها بلاطة أفقية تثبت فوقها الموتورات والمحولات وجميع التجهيزات الخاصة والمعدات وعلى أساس أن هذا النوع من المحطات لا يحتاج إلى مبنى أو عنبر للطلمبات ولكن يحتاج فقط إلى غرفة منفصلة كمكتب للإدارة.

٩-٢-٢ الطلمبات الرأسية
يستخدم هذا النوع من الطلمبات عندما يكون الرفع الأستاتيكى أكبر من (٥ متر) بمعنى أن الفرق بين منسوبى مياه المص والطرد كبير نسبيا. وفى هذه الحالة يكون إختيار الطلمبات الرأسية أوفر إقتصاديا وذلك لصغر طول عنبر المحطة وبالتالى صغر طول الفرش والمنشآت المدنية اللازمة والإستغناء عن تخليق مواسير المص إذا تم السحب من بيارة بين الدعامات. غير أنه يجب فى هذه الحالة مراعاة إتزان فرش المحطة وخاصة إذا كانت عبارة عن لبشة مسلحة على التربة مباشرة فيلزم مراعاة إتزان توزيع الإجهادات على التربة أسفل اللبشة مما قد يستدعى مد الفرش بعد عنبر الطلمبات من جهة الطرد لمسافة كافية لتوزيع الإجهادات على اللبشة بدون حدوث تركيز أسفل العنبر ، كما أن هذا النوع من المحطات قد يحتاج إلى زيادة فى عمق الفرش أسفل الطلمبات لتوفير العمق اللازم من المياه لضمان عدم تعرض الطلمبات لسحب مياه مع الهواء. كما يلزم أن يزيد إرتفاع عنبر الطلمبات لتمكين الونش المتحرك بداخل العنبر من رفع أى وحدة معطلة من وحدات الطلمبات ونقلها إلى أرصفة الصيانة الجانبية للإصلاح بسهولة ويسر.

٩-٢-٣ الطلمبات الأفقية
يستخدم هذا النوع من الطلمبات لضخ المياه تحت ضغوط عالية (أكبر من ٣ جوى) وذلك لتوليد الضغط اللازم للرى بإستخدام شبكات الرى بالرش أو الرى بالتنقيط أو الضخ فى مواسير إذ يلزم أن لا يقل

الضغط المتولد عن (٢,٥ جوى) عند نهاية الرشاشات لشبكة الرى بالرش أو (١,٥ جوى) عند نهاية النقاطات لشبكات الرى بالتنقيط. كما يستخدم هذا النوع من الطلمبات لرفع المياه إلى إرتفاعات كبيرة لملء الخزانات التى تنشأ لرى الأراضى الجديدة ذات الكونتورات العالية وغيرها من المهام التى تستخدم فيها هذه الطلمبات.

٩-٣ مكونات محطات الطلمبات

تتكون محطة الطلمبات عموما من خمسة أجزاء رئيسية كما يلى :

٩-٣-١ مجرى المص

لا يقل طول مجرى المص عن ٣٠ متر ويعمل على نقل قطاع المجرى المائى قبل المحطة بأبعاده ومناسيبه إلى القطاع المطلوب أمام حوض المص طبقا لعدد وحدات الطلمبات والعرض والمنسوب اللازم لكل وحدة. ودائما ما يتم تكسية جوانب هذا المجرى بمبانى الدبش بالمونة أو الخرسانة المسلحة وقد يكون تغير ميل هذه الجوانب خطيا Linear أو منحنيا جيبيا Sine Curve أو حائطا ملتويا Warped Wall وذلك فى المسافة بين القطاع الطبيعى للمجرى المائى وبداية حوض المص. ويتم تنفيذ هذه الميول بالشكل المطلوب مع عمل قدمات عليا وسفلى لهذه الميول تحقق الإتزان الإنشائى لها سواء كانت من مبانى الدبش أو الخرسانة العادية أو المسلحة. وفى جميع الأحوال يتم فرش بلاطات من الخرسانة العادية بسمك لا يقل عن (٥٠ سم) بقاع مجرى المص وعلى المناسيب اللازمة للتغيير التدريجى من القاع الطبيعى للمجرى إلى مناسيب القاع أمام حوض مص المحطة وعلى أن يتم التغيير فى المناسيب تدريجيا بحيث لا يزيد الميل فى القاع عن (٤ : ١). وقد يتم تنفيذ جزء من مجرى المص بالخرسانة المسلحة بالقاع والجوانب لتغطية خط الإنحدار الهيدروليكى مع طول اللبشة أسفل المحطة.

٩-٣-٢ حوض المص

ويمثل الجزء الأول من جسم المحطة ويتكون من الفرش والدعامات والأكتاف وبوابات المص وأرصفة المص ومسطح تخزين بوابات المص على أحد جانبى حوض المص ومداخل مواسير المص وشبك الأعشاب أمام مداخل مواسير المص. ويلزم أن تكون أبعاد ومقاسات عناصر حوض المص بحيث تحقق المتطلبات التصميمية وفى جميع الأحوال يجب أن تحقق المقاسات التالية :

- سمك الفرش المسلح لا يقل عن (٦٠ سم) فوق فرشة من الخرسانة العادية لا يقل سمكها عن (٢٠ سم).
- سمك الدعامات المسلحة لا يقل عن (٥٠ سم).
- سمك الأكتاف المسلحة لا يقل عن (٦٠ سم).
- سمك بلاطة أرصفة المص لا يقل عن (١٥ سم).
- طول كل من بلاطتى أرصفة المص لا يقل عن (٢ متر).
- البعد بين محورى بوابتى المص لا يقل عن (١ متر).
- المسافة بين رصيفى المص بمنطقة البوابات لا تقل عن (١,٥ متر).
- المسافة بين أول بوابة بالمص ونهاية الدعامات جهة المص لا تقل عن (٢ متر).
- المسافة بين نهايتى البوابة الثانية وبداية شبك الأعشاب أمام مواسير المص لا تقل عن (٥ متر) لمتطلبات قياس التصرفات.
- شبك الأعشاب أمام مواسير المص لا يزيد ميله مع الأفقى عن (٦٠°) درجة لتسهيل سحب الأعشاب من فوقه يدويا فى حالة تعطل المعدات الميكانيكية إن وجدت.

٩-٣-٣ عنبر الطلمبات

ويمثل الجزء الأوسط من جسم المحطة والذى يشمل بداخله الطلمبات والموتورات ولوحات التوزيع وأرصفة الصيانة والمحولات وغرف البطاريات ومكتب الإشراف على تشغيل المحطة ويكون العنبر بأبعاد وإرتفاعات تفى بالإحتياجات التصميمية لإستيعاب جميع هذه المهمات والتركيبات بما فيها الونش العلوى بالقدرة الكافية لنقل أى وحدة إلى أى من رصيفى الصيانة بجانبى المحطة. كما يلزم أن تحقق أبعاد وإرتفاعات العنبر الحدود التالية :

- الأعمدة الحاملة لهيكل العنبر والسقفين العالى والمنخفض تكون من الخرسانة المسلحة والأسقف والكمرات مستمرة بكامل عرض المحطة شاملة أرصفة الصيانة على جانبى مداخل المحطة وبدون عمل أى فواصل.
- لا يقل عرض رصيف الصيانة بكل من جانبى المحطة عن (٤ متر) مقاسا من وجه الكتف الداخلى بمساحة لا تقل عن (٢٤ متر مربع) بكل جانب.
- تعمل كمرتا الونش العلوى على منسوب يمكن معه للونش عند حمل أكبر قطعة من وحدات الطلمبات أو الموتورات التحرك بحرية ونقلها إلى أى مكان بالمحطة دون أية معوقات ويلزم أن يكون هناك خلوص حر بين أعلى منسوب كمرتى الونش وبطن سقف العنبر أو كمراته بما لا يقل عن (٢ متر).
- مجموع مساحة النوافذ بالعنبر جهتى المص والطرد لا تقل عن (٢٠ %) من مساحة المسقط الأفقى لأرضية العنبر.
- يلزم وجود مسافات بينية حول المعدات بداخل العنبر لا تقل عن (١,٥ متر) فى أى جهة لسهولة الحركة داخل عنبر الطلمبات وحول هذه المعدات.
- يكون منسوب السطح النهائى لأرضية العنبر أعلى من مناسيب الأرض الطبيعية المجاورة لمداخل المحطة بما لا يقل عن (٢٠ سم).
- يجب أن تشتمل أرضية العنبر على مجارى الكابلات والفتحات وجميع المتطلبات الميكانيكية والكهربائية ويلزم أن يتم تغطية جميع مجارى الكابلات والفتحات مع العزل الكامل للكابلات وإتصالاتها.
- يراعى أن يكون سقف العنبر من الخرسانة المسلحة بسمك لا يقل عن (١٠ سم) مع عمل كمرات ربط للهياكل الخرسانية الحاملة لعنبر الطلمبات.

٩-٣-٤ حوض الطرد

وهو يماثل حوض المص من حيث عدد الوحدات ومقاساتها وعند بدايته من جهة العنبر توجد مخارج مواسير الطرد للوحدات بجميع تجهيزاتها من بوابات عدم رجوع Flap Valves أو المخارج السيفونية لمواسير الطرد.

ويتكون حوض الطرد من العناصر الأساسية التالية :

- الفرشة المسلحة لحوض الطرد والتى يجب أن لا يقل سمك الخرسانة المسلحة لها عن (٦٠ سم) فوق طبقة من الخرسانة العادية بسمك لا يقل عن (٢٠ سم).
- مجموعة من الدعامات والأكتاف لتحديد عدد الممرات التى تتناسب مع عدد الوحدات للمحطة وبحيث لا يقل سمك الدعامات عن (٥٠ سم) والأكتاف عن (٦٠ سم) بحيث تفى بإحتياجات التصميم الإنشائى.
- عدد (٢) بوابة لكل فتحة على أن تكون المسافة بين محوريهما (١ متر) يتوسطها رصيف للطرد الذى يمتد لمسافة (٢ متر) على الأقل لكل من جهتى الطرد والمص حول البوابات والمسافة بين الرصيفين (١,٥ متر). ينتهى كل رصيف بكمرة عرضية من الخرسانة المسلحة بكامل عرض الفتحة بين الدعامات.

- يزود كل رصيف بكمرة تحمل فوقها سكة ونش فتح وقفل البوابات كما يمتد الرصيف إلى أحد جانبى الكتف لخلق مسطح مناسب لتخزين بوابات الطرد التى لم تستعمل وحسب المتطلبات الميكانيكية لمعدات المحطة.

٩-٣-٥ مجرى الطرد

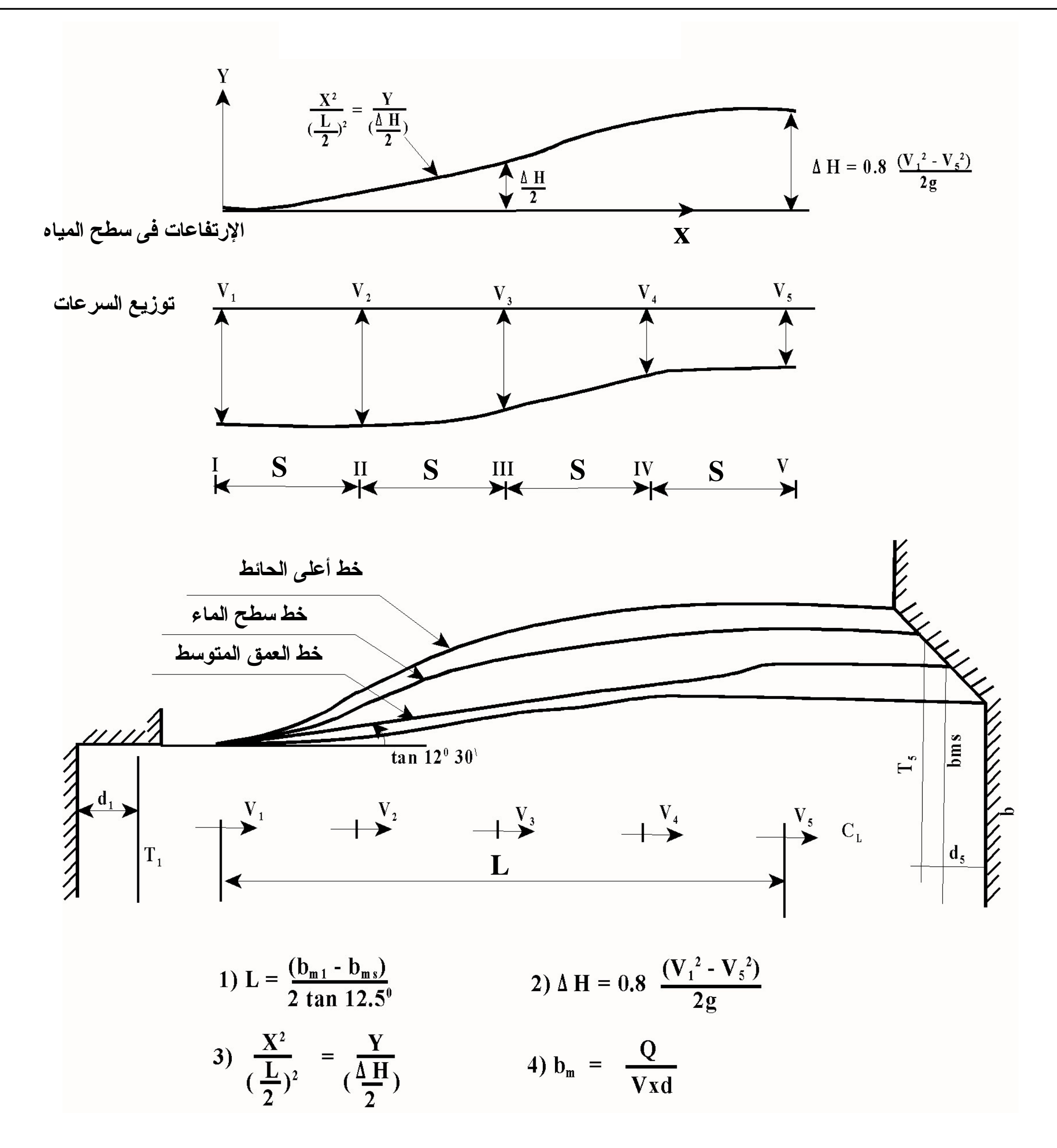
وهو يماثل مجرى المص من حيث الطول والعرض ويعمل على ربط نهاية حوض الطرد بمجرى الطرد الطبيعى بأبعاده ومناسيبه. وتنفذ الميول الجانبية لمجرى الطرد إما من مبانى الدبش بالمونة أو بالخرسانة المسلحة أو بالخرسانة العادية. وتعمل هذه الميول على إنتقال القطاع المائى إما من الرأسى إلى ميل مجرى الطرد أو بميل مجرى الطرد الثابت مع التغيير فى عرض القاع من نهاية حوض الطرد إلى المجرى الطبيعى وفى الطول المحدد بـ(٣٠ متر). ويتم تنفيذ هذه الميول على شكل منحنى جيبى Sine-Curve أو على شكل حائط ملتوى Warped Wall وذلك حسب التصميم الهيدروليكى للحائط الملتوى لمجرى الطرد طبقا للمبين بالشكل (٩-١) بحيث يقلل الفواقد الهيدروليكية بقدر الإمكان ولتقليل الرفع الكلى لوحدات المحطة. وفى حالة مجرى المص فإن الإنخفاض فى سطح المياه (ΔH) يؤخذ مساويا) $1.1\,\frac{V_5^{\,2} - V_1^{\,2}}{2g}$ (بدلا من قيمة الإرتفاع فى سطح المياه الموضحة فى شكل (٩-١) والتى تساوى) $0.8\,\frac{V_1^{\,2} - V_5^{\,2}}{2g}$ (وتعمل فرشة مجرى الطرد من الخرسانة العادية على شكل بلاطات بمقاسات مناسبة وسمك (٥٠ سم) وذلك فى حالة عدم الإحتياج إلى مجرى الطرد لتغطية خط الإنحدار الهيدروليكى. وقد يتم تنفيذ مجرى الطرد بالكامل أو جزء منه بالخرسانة المسلحة أو العادية فى حالة الإحتياج إلى هذا الطول لتغطية خط الإنحدار الهيدروليكى.

٩-٤ البيانات اللازمة لإختيار محطة الطلمبات

وتشتمل على البيانات التى على ضوئها يمكن تحديد تصرف المحطة الكلى وعدد الوحدات المطلوبة وتصرف كل وحدة.

٩-٤-١ الزمام الكلى الذى تخدمه المحطة

يتم حساب المساحة الكلية التى تخدمها المحطة سواء كانت محطة رى أو محطة صرف وذلك بحساب المساحة التى يخدمها المجرى المائى سواء كانت ترعة للرى أو مصرفا يقوم بصرف هذه الأراضى مع مراعاة الأراضى القابلة للزراعة على جانبى ترعة الرى وتحديد الزمام المرتب ريه على محطة الرى بدقه حاليا ومستقبلا وخاصة عند إنشاء محطات لرى الأراضى الجديدة مع مراعاة التوسع الأفقى للزراعات المستصلحة التى يقوم بها المزارعون وما يترتب عليها من توسع فى الصرف الزراعى.



شكل (٩-١) الحائط الملتوى لمجرى الطرد

٩-٤-٢ التصرفات الكلية لمحطات طلمبات الرى

يراعى عند حساب التصرفات الكلية لمحطة الطلمبات أن تفى بالإحتياجات المائية لرى الزمام المرتب عليها وذلك فى حالة أقصى الإحتياجات والتى تحدث فى أشهر الذروة فى الصيف مع الأخذ فى الإعتبار عند حساب هذه التصرفات التركيب المحصولى السائد والإحتياجات المائية لكل محصول مع مراعاة أن التركيب المحصولى يتغير تبعا لحالة السوق الأمر الذى يلزم معه أن يؤخذ التركيب المحصولى الذى يتطلب أقصى تصرف مطلوب من المحطة وعليه فإن :

- أقصى تصرف لمحطة طلمبات الرى = المساحة الكلية بالفدان x المقنن المائى للفدان فى اليوم فى الصيف
- أدنى تصرف لمحطة طلمبات الرى = المساحة الكلية بالفدان x المقنن المائى للفدان فى اليوم فى الشتاء

- التصرف الأقصى فى اليوم = م^{3} / يوم

- التصرف الأقصى فى الثانية = $\frac{\text{م}^3 / \text{يوم}}{٢٤ \times ٦٠ \times ٦٠}$ = م^{3} / ث

وبعد تحديد قيمة التصرف الأقصى والأدنى للمحطة يتم ربط بيانات التصرفات مع مناسيب مجارى المص والطرد طبقا لموقع المحطة المختار والذى يتحدد منه الرفع الأستاتيكى للمحطة (وهو الفرق بين منسوبى أعلى طرد وأقل مص).

وبمعلومية التصرف الكلى والرفع الأستاتيكى يتم عمل دراسات جدوى إقتصادية لإختيار عدد الوحدات اللازمة وتصرف كل وحدة.

- والعدد الأمثل لوحدات المحطة هو (عدد ٣ وحدات + عدد ١ وحدة إحتياطية).
- ويراعى أن منتجى الطلمبات يعرضون إنتاجهم طبقا لتصرف كل وحدة وغالبا ما تكون التصرفات للوحدات حتى (١٦ م^{3} / ث) ذات إنتاج نمطى لمعظم المصانع المنتجة للطلمبات وموتوراتها. أما التصرفات الأكبر من ذلك فإنها تحتاج لخطوط إنتاج خاصة وفى الغالب تكون تكلفتها عالية.

٩-٤-٣ التصرفات الكلية لمحطات طلمبات الصرف

يتبع فى حساب التصرفات الكلية لمحطات طلمبات الصرف وإختيار عدد الوحدات نفس الخطوات التى إتبعت فى حساب تصرفات محطات طلمبات الرى غير أنه عند حساب تصرفات محطات الصرف يؤخذ نسبة من مقنن الرى كمقنن للصرف وتتراوح هذه النسبة من (١٥ % إلى ٢٠ %) من مقنن الرى للفدان فى اليوم. وفى مناطق الإستزراع الجديدة والتى تحتاج التربة فيها لعمليات غسيل مستمرة تحسب التصرفات لمحطات الصرف بحيث يراعى فى هذه الحالة فقط حساب التصرف الأقصى على أنه نسبة قد تصل إلى أكبر من (٥٠ %) من مقنن الرى وتتوقف هذه النسبة على نوع التربة ودرجة الملوحة وفترات الغمر والغسيل ومدى بقاء المياه فى التربة كل غمرة والتى يتحدد منها مقنن الصرف للفدان فى اليوم مقارنة بمقنن الرى للفدان فى اليوم.

٩-٥ تشغيل محطات الطلمبات

يتم تشغيل وإدارة محطات الطلمبات ببرامج تشغيل تحقق الغرض من عمل المحطة سواء كانت محطة طلمبات رى أو محطة طلمبات صرف.

٩-٥-١ تشغيل محطات طلمبات الرى

يتم تشغيل محطة طلمبات الرى وتحديد ساعات الإدارة لكل وحدة من وحدات المحطة وعمل دورة التشغيل للوحدات بحيث تفى بإحتياجات الرى على مدار اليوم ، وطبقا لبيان الإحتياجات المائية الشهرية التى تعد بمعرفة مهندسى رى المركز المختص وتعتمد من الإدارة العامة للرى وترسل لمدير تشغيل المحطة وذلك قبل بداية الأسبوع الأخير من كل شهر لتكون بمثابة البرنامج الذى يتم على أساسه إعداد برنامج تشغيل المحطة خلال الشهر التالى. وفى جميع الأحوال يزود حوض طرد محطة الرى بالمعدات اللازمة لبيان منسوب مجرى الطرد. وعلى ضوء تذبذب هذا المنسوب بالزيادة أو بالنقص يتم إيقاف أو تشغيل أى من وحدات المحطة وذلك لتلافى حدوث فيضان لمجرى الطرد أو نقص فى كميات المياه التى ترفعها المحطة.

وتحتفظ كل محطـة للرى بسجلات داخل المحطة مبين فيها المساحة التى تخدمها المحطة وعدد الوحدات وتصرف كل وحدة والرفع الأستاتيكى وعدد ساعات التشغيل لكل وحدة ومناسيب المص والطرد وبالتالى كميات المياه التى تم رفعها بواسطة المحطة خلال الـ ٢٤ ساعة وعلى مدار العام وكذلك كميات الوقود أو الطاقة الكهربائية التى تم إستنفاذها بواسطة وحدات المحطة.

٩-٥-٢ تشغيل محطات طلمبات الصرف

يتم تشغيل محطـة طلمبات الصـرف طبقا لكميات المياه الواردة إلـى موقع المحطة من شبكة المصارف المرتب صرف مياهها عن طريق هذه المحطة. وعلى ذلك فإن عدد الوحدات العاملة يتحدد تبعا لمناسيب وكميات المياه الواصلة من شبكة الصرف أمام المحطـة أى يحدده منسوب المياه بحوض المص فكلما إرتفع منسوب المياه بالمص يتم تشغيل عدد أكبر من الوحدات وكلما إنخفض منسوب المياه بحوض المص يوقف عدد من الوحدات بحيث تكون دائما عدد الوحدات العاملة كافية للمحافظة على منسوب ثابت بنهاية المصرف الرئيسى أمام المحطـة. ويتم تحديد هذا المنسوب طبقا للقطـاع التصميمى للمصـرف الرئيسى وبيانات إنشاء المحطة.

تزود كل محطـة للصرف بالمعدات اللازمة لبيان مناسيب المياه بالمص والطرد وكذلك المعدات التى تعمل على إيقاف وحدات المحطـة أوتوماتيكيا فى حالـة إنخفاض منسوب المص عن حد معين لتلافى التشغيل الجاف لأى من وحدات المحطة.

يحتفظ بداخل كل محطـة بسجلات مبين بها المساحة الكلية للمحطـة وعدد وحداتها وتصرف كل وحدة ومناسيب المص والطرد الأقصى والأقل ومنها الرفع الأستاتيكى وكذلك عدد ساعات التشغيل اليومى لكل وحدة وكميات المياه المنصرفة خلال اليوم وعلى مدار العام كذلك كميات الوقود المستخدم والزيوت والشحومات أو كميات الطاقة الكهربائية المستنفذة بواسطة وحدات المحطة.

٩-٦ إحتياطات التصميم الإنشائى لمحطات الطلمبات

عند إعداد التصميم الإنشائى لمحطـات الطلمبات سواء كانت للرى أو للصـرف الزراعـى أو للصـرف الصحى أو لغيرها من الأغراض لرفع المياه فإنه يلزم توفير مجموعة من البيانات تستخدم كأساس لإعداد التصميم الإنشـائى الآمـن لمحطـة الطلمبات التـى يكـون قد تـم تحديد نـوع وعدد وحداتها من الناحية الميكانيكية ومن أهم هذه البيانات خط الإنحدار الهيدروليكى Hydraulic Gradient وينشأ عن وجود فرق بين أعلا منسوب للمياه بمجرى الطرد وأوطى منسوب للمياه بمجرى المص مما يولد ضاغطا مائيا يعمل على تسرب المياه أسفل فروشـات المحطـات ويلزم أخذه فى الإعتبار عند إعداد التصميم الإنشائى الآمن لعناصر المحطـة. ويعمل الإنحدار الهيدروليكى للمياه المتسربة من جهة الطرد إلى جهة المص مرورا بأسفل فروشات المحطة على وجود ضاغط مائى ينشأ عنه ضغوط رافعة Uplift Pressure يلزم على المصمم مجابهتها بما يتناسب مع شدتها فضلا عن أن الإنحدار الهيدروليكى لتدفق التسرب قد يكون من الحدة بدرجة قد تصل بسرعة الرشح إلى قيم كبيرة قد تتسبب فى حدوث تخاريب Piping لتربة الأساس أسفل الفرش الذى ترتكز عليه المحطـة. وتحدث تلك التخاريب نتيجة لإكتساح المياه المتسربة لبعض حبيبات التربة تاركة مكانها فراغات تؤدى إلى خطورة جسيمة على منشأ المحطة. أضف إلى ذلك أن المياه المتسربة قد تصل فى نهاية رحلتها عند نهاية الفرشة المسلحة جهة المص وهى ما زالت تحت ضـاغط بيزومترى كبير نسبيا. وبهذا قد تتوفر لها القدرة على التغلب على وزن التربة فتدفعها إلى أعلا محدثـة مـا يسمى بظاهرة "الفوارات". ومن هنا فإن التصميم الآمن لفرش المحطة وعناصرها الإنشائية الأخرى لابد وأن يأخذ فى الإعتبار كيفية التغلب على الظواهر الثلاثة التالية :

- الضغوط الرافعة Uplift Pressures .
- التخاريب Piping .
- ظاهرة الفوارات.

وللتغلب على هذه الظواهر الثلاث والمحتمل تواجدها كلها أو بعضها فإنه يمكن إستخدام نظرية بلاى (Bligh Theory) لتحديد الطول الآمن لمسار خط الإنحدار الهيدروليكى من المعادلة (٩-١) (شكل ٩-٢).

$$L = CH \qquad (9\text{-}1)$$

حيث C = معامل الإنحدار الهيدروليكى للتربة أسفل الفرش ويحسب من الجدول (٩-١)
H = الضاغط الهيدروليكى

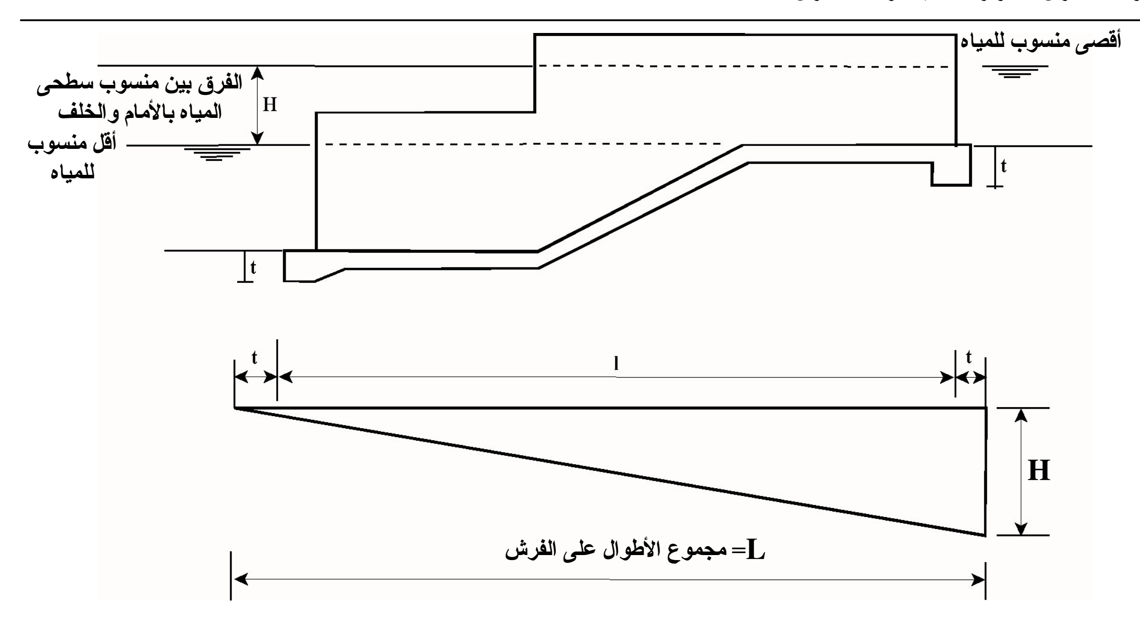
جدول (٩-١)

نوع التربة	طمي	رمل ناعم	رمل خشن	طين متماسك	زلط
قيمة المعامل C	١٨	١٥	١٢	٥ ـ ٨	٥

وليس من الضرورى أن يكون الضاغط الهيدروليكى (H) هو الفرق بين منسوب أقصى طرد ومنسوب أقل مص بل يجب أن يكون هذا الضاغط على حسب الحالة الفعلية التى يتعرض لها المنشأ لأطول فترة زمنية ممكنة.

ويجب مراعاة مناسيب الطرد فى المحطات وخاصة محطات الصرف التى تصرف مياهها على البحيرات المتصلة بالبحر أو تصرف على البحر مباشرة فيلزم مراعاة مناسيب المد والجزر وكذلك مناسيب المياه القصوى فى حالة النوات إذا تجاوزت فترة الدوام لها أسبوعا.

إذا كان طول الفرش طبقا للإحتياجات الميكانيكية بالنسبة للمحطات يزيد أو يساوى الطول المطلوب من تطبيق المعادلة (٩-١) فإن هذا الطول يعتبر آمنا أما إذا كان هذا الطول أقل من المطلوب توافره من واقع المعادلة (٩-١) فإنه يلزم التغلب على هذا الفرق بأحد الأساليب التالية :

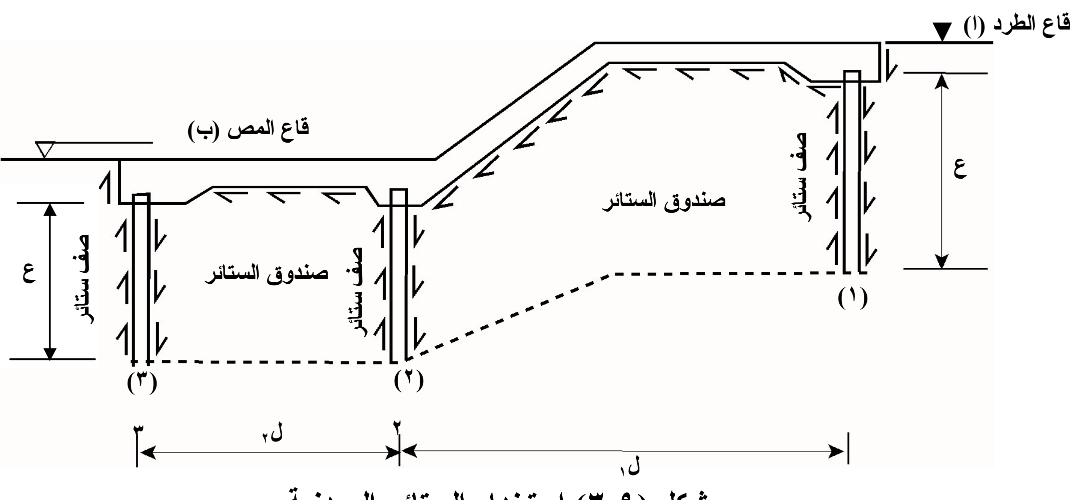


شكل (٩-٢) الطول الآمن لمسار خط الإنحدار الهيدروليكى

٩-٦-١ إستخدام الستائر المعدنية Steel Sheet Piles

تطبيقا لنظرية بلاى Bligh وبفرض أن خط الزحف يكون ملاصقا لأوجه القاطع الرأسى (الستائر المعدنية) فإن هذا يعنى أنه عند حساب طول خط الزحف فإنه (يضرب الطول الرأسى لخط الستائر الواحد x معامل قيمته ٢). غير أنه فى المحطات لا يجوز أن يقل عدد صفوف الستائر عن صفين واستكمال عمل صندوق حول الفرشة بكاملها وعلى أن تحدد أطوال كل صف بحيث تفى بالمتطلبات التى تغطى طول خط الإنحدار الهيدروليكى الناتج من المعادلة (٩-١) وفى حالة إستخدام أكثر من صفين للستاير فيلزم أن لا تقل المسافة الأفقية بين أى صفين عن ضعف الطول المتوسط للصفين أى أن :
(ل١ أو ل٢ ≤ ٢ ع) حسب الشكل (٩-٣).

وفى جميع الأحوال يلزم ألا يقل الطول الداخل من الستائر فى قدمة الفرشة المسلحة عن (٢٠ سم) كضمان فاعلية خط الستائر وعدم تسرب المياه.



شكل (٩-٣) إستخدام الستائر المعدنية

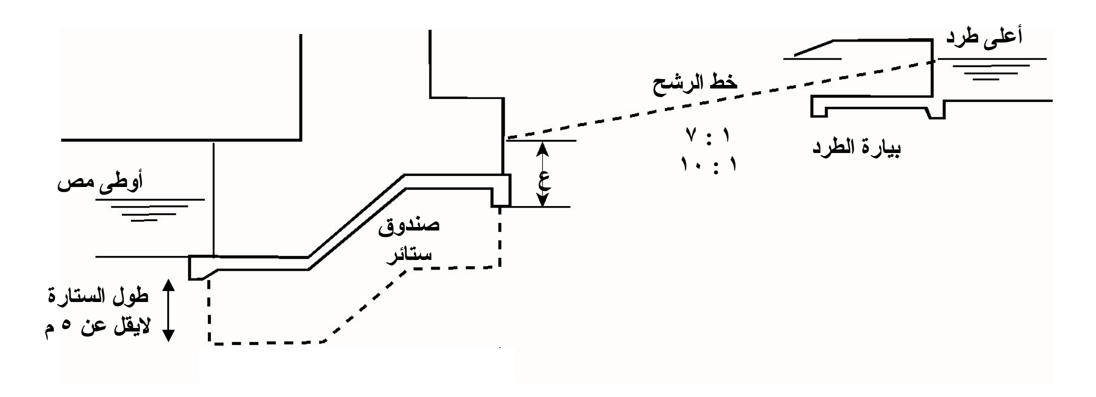
٩-٦-٢ الطول الأمن لصندوق الستائر حول فرش المحطة

يلزم أن يحاط فرش المحطة بصندوق من الستائر المعدنية يتحدد طولها بما يفى بتغطية خط الإنحدار الهيدروليكى وفى حالة ما إذا كان طول الفرش يغطى طول الإنحدار الهيدروليكى وأن طول الستائر لا يلزم لتغطية أى جزء من هذا الطول فإن الطول للستارة يجب أن لا يقل عن (٥ متر) بأى حال من الأحوال وذلك للمحافظة على ثبات التربة وحصرها أسفل الفرش وخاصة فى مناطق إتصال الفرش بقاع المص أو بقاع الطرد كما يجب تجنب التأسيس السطحى لفرش المحطة وخاصة أن محطات الطلمبات بخلاف القناطر والأهوسة تتعرض لذبذبات مستمرة نتيجة لتشغيل الموتورات والطلمبات والمعدات الميكانيكية التى تثبت داخل عنبر الطلمبات فى المحطة وفوق أساسات الفرش.

٩-٦-٣ فصل بيارة الطرد ووضعها على مسافة مناسبة بعيدة عن المحطة

مع إطالة مواسير الطرد لزيادة طول خط الإنحدار الهيدروليكى فإن ميل خط الرشح فى المسافة من نهاية حوض طرد المواسير وحتى بداية الفرش أسفل عنبر المحطة يؤخذ من (١ : ١٠) وحتى (١ : ٧) حسب نوع التربة ومنه يمكن حساب منسوب مياه الرشح فى التربة أمام عنبر الطلمبات والفرق بين هذا المنسوب وأوطى منسوب بالطرد وهو الضاغط الهيدروليكى أو فرق التوازن الأقصى "ع" والذى يلزم تغطيته بأطوال صندوق الستائر حول فرش المحطة والذى يجب أن لا يقل عن (٥ متر) فى حده الأدنى حسب ما هو موضح بالشكل (٩-٤).

وفى جميع الأحوال يلزم أن تعلو مناسيب الأرض حول موقع المحطة على منسوب خط الرشح بما لا يقل عن (١ متر) لتفادى ظهور مياه الرشح حول المحطة ومداخلها.



شكل (٩-٤) موقع بيارة الطرد بالنسبة لفرش المحطة

٩-٦-٤ تبطين كل أو جزء من مجرى الطرد بالخرسانة المسلحة

يمكن تبطين قاع وجوانب مجرى الطرد بالخرسانة المسلحة طبقا للأصول الفنية لتنفيذ التبطين وتزويده بالفواصل العرضية والطولية إذا لزم الأمر والمانعة لمرور المياه مع المرونة الكافية لمواجهة تمدد خرسانة التبطين فى مواضعها سواء كانت بقاع أو جوانب مجرى الطرد. وفى هذه الحالة يعتبر الجزء المبطن من مجرى الطرد بالإضافة إلى حوض الطرد المنفذ من الخرسانة المسلحة جزءا مصمتا وغير منفذ للمياه وعليه فإن بداية خط الإنحدار الهيدروليكى تبدأ بعد نهاية الجزء المبطن من مجرى الطرد ومنه يمكن حساب طول خط الإنحدار الهيدروليكى ومقارنته بالطول المطلوب لتحقيق أمان للمنشأ.

٩-٦-٥ تبطين كل أو جزء من مجرى المص بالخرسانة المسلحة

هذا التطبيق مماثل لتبطين مجرى الطرد طبقا للبند ٩-٦-٤ على أن تفى خرسانات التبطين بثبات مواد التبطين ومقاومتها للإزاحة الرأسية من ضغوط المياه أسفلها وكذلك التمدد والإنكماش الناتج عن التغير فى درجات الحرارة بالموقع. وبذلك فإن طول خط الإنحدار الهيدروليكى يحسب من نهاية حوض الطرد وحتى بداية الجزء المبطن من مجرى المص ومقارنة هذا الطول بالطول التصميمى المطلوب تحقيقه.

٩-٧ الأساسات وأنواعها لمحطات الطلمبات

٩-٧-١ جسات الموقع

بعد تحديد الموقع النهائى لمحطة الطلمبات فى الطبيعة ووضع علامات محورى المحطة الطولى والعرضى والأبعاد الطولية والعرضية لموقع المحطة يلزم عمل مجموعة من الجسات لا تقل عن ٥ جسات منها عدد ٢ جسة بالمص وعدد ٢ جسة بالطرد وواحدة على الأقل أسفل عنبر المحطة بالمحور وطبقا للكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات. ويتم تصنيف عينات التربة المستخرجة من الجسات وعمل التجارب المعملية اللازمة طبقا للكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات. وعلى أن لا يقل عمق الجسة عن (٢٠ متر) مع الوصول إلى الطبقة الرملية المستمرة والتى لا يقل عمقها عن (٤ متر) أو الطبقة الصخرية.

٩-٧-٢ تحديد نوع الأساسات المناسب

من واقع تقرير التربة والأساسات يمكن تحديد نوع التأسيس الآمن لتنفيذ المحطة والذى يمكن أن يكون لبشة من الخرسانة المسلحة أو أساسات خازوقية مع مراعاة نوعية المياه الجوفية وتأثيرها على منشآت المحطة. ويرجع فى ذلك إلى الكود المصرى لميكانيكا التربه وتصميم وتنفيذ الأساسات.

٩-٨ الأحمال الحية والميتة الدائمة على منشآت المحطات ومتطلبات التصميم

لما كانت المحطات فى معظم أشكالها تتكون من وحدات طلمبات كاملة بمحركاتها الميكانيكية أو الكهربائية وتكون كل وحدة منفصلة عن الأخرى بواسطة دعائم وأكتاف فيتم حساب جميع الأحمال الحية والميتة الناتجة عن كل وحدة بحيث يتم حساب مجموع هذه الأحمال بالنسبة للدعامة على الفرشة والتى تؤثر فى المسافة المحصورة بين محورى فتحتين (وحدتين) وعلى جميع المناسيب. أما الأحمال المؤثرة على الأكتاف فتؤخذ على الكتف الواحد فى المسافة المحصورة بين محور الفتحة الجانبية وحتى رصيف الصيانة الجانبى فى حالة تحميل الرصيف على الكتف بواسطة كوابيل ممتدة من الحوائط العرضية للمحطة وعلى أن تشمل الأحمال المؤثرة على المحطة ما يلى :

- الأحمال الميتة وهى أوزان جميع العناصر الإنشائية من خرسانات ومبانى وأرضيات وتبليطات وغيرها.
- الأحمال الحية المؤثرة على كافة المناسيب والمستويات والتى تتحدد طبقا للمتطلبات الميكانيكية لتشغيل المحطة والتى لا تقل قيمتها عن :
  ١ طن / م^{2} على مساحة أرضية بوابات المص وأرضية بوابات الطرد وأرضية العنبر
  ٢ طن / م$_{2}$ على مساحة أرضية الصيانة بجانبى المحطة
- الأحمال الميكانيكية الخاصة بالمعدات الميكانيكية والكهربائية مثل الطلمبات والموتورات والأوناش والمحولات الكهربائية وغيرها من الأحمال مع الأخذ فى الإعتبار عند حساب قيمة هذه الأحمال معامل الرفع للأحمال المتحركة والذى تحدد قيمته بمعرفة المورد للمعدات الميكانيكية والكهربائية.
- الحمل الأستاتيكى المكافئ لتأثير الرياح وذلك طبقا للكود المصرى لحساب الأحمال والقوى فى الأعمال الإنشائية وأعمال المبانى.

- تأثير الزلازل طبقا للكود المصرى لحساب الأحمال والقوى فى الأعمال الإنشائية وأعمال المبانى.
- الصدمة الجانبية الناتجة عن تشغيل الأوناش وقدرها (١٠ %) من الحمل الرأسى ويمكن أن تؤثر فى الإتجاه الطولى لحركة الونش فى حالة إستعمال ونش يدوى.
- ضغوط التربة الجانبيه بأخذ معامل ضغط التربة عند السكون فى الحساب .

٩-٩ إعتبارات تصميم الفرشة المسلحة والدعامات والأكتاف فى الإتجاه الطولى للمحطة

فى حالة إرتكاز الفرشة المسلحة على التربة مباشرة تتبع الخطوات التالية :
يتم تقسيم المحطة فى الإتجاه الطولى إلى ثلاثة أجزاء رئيسية أو أكثر حسب تركيز الأحمال بها وهى : حوض المص - عنبر الطلمبات - حوض الطرد ويقسم كل جزء من الأجزاء الثلاثة إلى شرائح وتحسب قيمة الأوزان والأحمال الميتة على كل جزء. وكلما زاد عدد الأجزاء كلما زادت دقة الحسابات وتحدد مواقع تأثير كل حمل من الأحمال بالنسبة لبعده عن خط بداية الفرشة من إحدى الجهتين وذلك بالنسبة للأحمال الميتة والأحمال الحية للمعدات.

يتم حساب البعد بين نقطة تأثير محصلة الأحمال الحية والميتة R ومركز تأثير ثقل مساحة الفرشة أى حساب مقدار الإزاحة Eccentricity(e)

يتم حساب قيم الإجهاد على التربة أسفل الفرش عند الأطراف بعد حساب قيمة العزوم الناتجة على شريحة الفرشة من لا مركزية الأحمال ($M_e = R.e$) وعزم القصور الذاتى I للشريحة ومساحتها وتطبيق المعادلة العامة للإجهادات عند طرفى الشريحة {المعادلة (٩-٢)}.

$$f_{1_2} = -\frac{R}{A} \pm \frac{M_e \, . Y}{I} \qquad (9\text{-}2)$$

حيث
f_{1_2} = قيم الإجهاد الحادث على التربة عند طرفى الفرشة
R = مجموعة الأحمال الميتة والحية على الشريحة وتساوى مجموع الأحمال الميتة والحية على الدعامة وشريحة الفرشة بين محورى وحدتين للطلمبات متجاورتين
A = مساحة شريحة الفرشة بين وحدتين متجاورتين
M_e = العزوم الناتجة عن لا مركزية محصلة الأحمال بالنسبة لمركز ثقل مساحة الشريحة
Y = نصف طول الشريحة من الفرشة تحت الإعتبار
I = عزم القصور الذاتى لشريحة الفرشة تحت الإعتبار

وفى جميع الأحوال يجب أن لا تزيد أى من قيمتى f_{1_2} عن القيم المسموح بها للإجهاد على التربة أسفل الفرشة فى حالة إرتكازها على التربة مباشرة طبقا للكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

وفى حالة تحميل المحطة على خوازيق فيتم توزيع الخوازيق أسفل الدعامات طبقا للأحمال الحية والميتة الواقعة على كل جزء من الأجزاء الثلاثة لشرائح الدعامة والفرشة وبما يتناسب مع تركيز هذه الأحمال فى كل جزء وتجرى عدة محاولات لتحديد أماكن الخوازيق بحيث تنطبق بقدر الإمكان محصلة أحمال الخوازيق مع محصلة الأحمال الميتة والحية للقوى المؤثرة وتقليل اللامركزية والعزوم الناتجة عنها. ويتحدد الحمل الأقصى على الخازوق من واقع تصميم قطاع الخازوق وطوله ومنطقة إرتكازه على

التربة وعليه يتحدد العدد الكلى اللازم من الخوازيق لتحمل المحطة ومنشآتها. ويتم تحديد الحمل الفعلى الواقع على أى من الخوازيق بتطبيق المعادلة (٩-٣) التالية :

$$P_{(Pile)} = \frac{\sum P}{n} \pm \frac{M.Y}{I_P} \qquad (9\text{-}3)$$

حيث

$P_{(Pile)}$ = الحمل الفعلى على الخازوق تحت الحساب

$\sum P$ = مجموع الأحمال

n = عدد الخوازيق أسفل الدعامة أو الكتف تحت الحساب

M = العزوم الناتجة عن لا مركزية مركز ثقل مجموعة الخوازيق بالنسبة لمحصلة الأحمال الميتة والحية للشريحة تحت الحساب

Y = بعد الخازوق عن مركز ثقل مجموعة الخوازيق

I_P = عزم القصور الذاتى لمجموعة الخوازيق $(nY)^2$

لتصميم الدعامات فى الإتجاه الطولى وتحديد التسليح الرئيسى يتم حساب العزوم عند عدة نقاط لتحديد شكل منحنى العزوم على القطاع الطولى للدعامة وهو نتيجة لقيم العزوم للإجهادات الواقعة على التربة أسفل الدعامة مطروحا منها مجموع العزوم الناتجة من القوى الرأسية (الأحمال الميتة والحية) على القطاعات المختلفة.

يتم حساب الإجهادات على القطاعات الخرسانية المسلحة للدعامة عند المواقع المختلفة نتيجة للعزوم الواقعة عليها. ويجب أن لا تتجاوز قيم هذه الإجهادات فى الشد القيم المسموح بها للمنشآت المائية من الخرسانة المسلحة Non Cracked Concrete وعلى ضوء هذه الإجهادات يتم حساب حديد التسليح الرئيسى أسفل الدعامات وداخل الفرشة المسلحة ويتم توزيع أسياخ حديد التسليح أسفل الدعامات فى مسافة لا تتجاوز سمك الدعامة زائد ضعف سمك الفرشة المسلحة أسفل الدعامة مع الإلتزام بأقل نسبة للحديد طبقا للكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة ولا تقل عن (٠,٢٥ %) من مسطح قطاع الدعامة.

يراعى تزويد الدعامات بحديد التسليح الطولى العلوى بما لا يقل عن (٢٠ %) من مساحة التسليح الطولى السفلى.

يتم تطبيق نفس الخطوات السابقة لتصميم وتسليح الأكتاف مع مراعاة إضافة الأحمال الناتجة عن باكية أرصفة الصيانة والمحملة على كوابيل ممتدة من الحوائط العرضية للمحطة وعبر الأكتاف.

٩-١٠ التسليح العرضى للفرشة والتسليح الرأسى والأفقى للدعامات والأكتاف

تتبع الخطوات التالية عند حساب كميات حديد التسليح المطلوب :

- يتم تقسيم المحطة فى الإتجاه الطولى إلى عدة قطاعات عرضية وغالبا ما تكون من ثلاثة إلى خمسة قطاعات حسب تكوين وإرتفاعات الدعامات والأكتاف وحساب جميع القوى المؤثرة على كل قطاع.
- يتم تصميم كل قطاع من القطاعات على أنه هيكل واحد من الخرسانة المسلحة R.C. Culvert مع الأخذ فى الإعتبار حالات التحميل المختلفة من الأحمال الميتة والحية وملء وتفريغ الوحدات بالمياه من الداخل وضغط الأتربة المعرضة لها من الخارج سواء كانت جافة أو مشبعة بالمياه

Saturated Soil or Dry Soil وكذلك تأثير قوى الرفع الرأسية للمياه أسفل الفرش Uplift وأهم حالات التحميل التى يتم حسابها الآتى :

١. فور الإنتهاء من الإنشاء حيث الموقع جاف والتربة جافة.
٢. أثناء تشغيل المحطة حيث جميع الفتحات مملوءة بالمياه والتربة مشبعة بالمياه.
٣. أثناء أعمال الصيانة حيث تكون الفتحة تحت الصيانة خالية من المياه والمياه تملأ باقى الفتحات وتربة الموقع خلف الأكتاف تكون مشبعة بالمياه حتى مستوى خط الرشح الجانبى بميل (١ : ٧) إلى (١ : ١٠) حسب طبيعة التربة.

- يتم حساب العزوم الناتجة عن ذلك وتوزيعها على مكونات وأجزاء القطاع حسب جساءة كل منها Stiffness ورسم منحنيات العزوم لجميع حالات التحميل السابقة ومنها يتم حساب القيم القصوى للعزوم عند كل قطاع نتيجة لحالات التحميل الممكن حدوثها فى نفس الوقت مع إعتبار وجود بلاطات وكمرات أرصفة المص والطرد وأرضيات العنبر وإرتكاز الدعامات والأكتاف على هذه البلاطات إما إرتكازا مفصليا Hinged أوتثبيتا كاملا بالفرشة Fixed . وفى المناطق الخالية من الكمرات وبلاطات الأرصفة ببئرى المص والطرد يتم التغلب على ذلك بوضع كمرات أفقية طولية أعلى الدعامات والأكتاف.
- من الحسابات السابقة يتم حساب كميات حديد التسليح العرضى للفرشة المسلحة وكذلك التسليح الرأسى للدعامات والأكتاف ويؤخذ التسليح الأفقى للدعامات والأكتاف بحيث لا يقل عن (٠,٢٥ %) من مساحة القطاع الخرسانى يوزع أفقيا على وجهى الدعامة أو الكتف وذلك طبقا للكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

٩-١١ الإجهاد الأقصى لحديد التسليح والخرسانة بالمحطات

الإجهاد الأقصى فى الشد لحديد التسليح المستخدم فى الفرشة والدعامات والأكتاف وجميع الأجزاء الخرسانية أسفل أرضية العنبر والتى تكون ملامسة للمياه بصورة دائمة يفضل ألا يزيد عن (١٠٠٠ كجم / سم^{٢}).

الإجهاد الأقصى فى الشد لحديد التسليح فى الأرصفة والأرضيات فوق منسوب المياه وأرضية العنبر يفضل ألا يزيد عن (١٢٠٠ كجم / سم^{٢}).

الإجهاد فى الشد لحديد التسليح للأعمدة والكمرات وسقف العنبر وجميع أجزائه يفضل ألا يزيد عن (١٤٠٠ كجم / سم^{٢}).

الإجهاد الأقصى للخرسانة تحت سطح المياه فى مناطق الفرشة المسلحة والدعامات والأكتاف يجب ألا يتجاوز حدود المواصفات. وتطبق إشتراطات الكود المصرى لتصميم وتنفيذ الخرسانة المسلحة لباقى أجزاء المحطة.

٩-١٢ نسب حديد التسليح الدنيا لعناصر محطة الطلمبات

يتم تحديد كميات حديد التسليح اللازمة لعناصر المحطة المختلفة طبقا لمتطلبات التصميم والذى يحكمه الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

٩-١٣ السرعات القصوى للمياه داخل وحدات المحطة

يتم تحديد أبعاد الممرات بين الدعامات لكل وحدة من وحدات المحطات على أساس كمية المياه التى تقوم وحدة المحطة برفعها والسرعة القصوى المسموح بها داخل عناصر المحطة المختلفة عند إمرار هذا التصرف والذى غالبا ما تحكمه الإشتراطات الميكانيكية للوحدات.

ومن الناحية الإنشائية المدنية للمحطات تعتبر الحدود القصوى للسرعة المسموح بها عاملا أساسيا وهاما لتحديد أبعاد المجرى المائى لكل وحدة أى المسافة بين الدعامات ومنسوب الفرش بينها وكذلك أبعاد ومناسيب مجرى المص أمام مدخل حوض المص مباشرة حيث يوجد موقع شبكة الأعشاب الأولى وكذلك موقع شبكة الأعشاب الثانية عند مدخل مواسير المص. وفيما يلى الحدود القصوى للسرعة التى يسمح بها بالمحطات :

- (٠,٧٠ م / ث) السرعة المسموح بها للمياه بحوض المص وعند مرورها من شبكة الأعشاب الأولى أمام مدخل حوض المص.
- (٠,٥٠ م / ث) السرعة المسموح بها لمرور المياه من شبكة الأعشاب الثانية أمام مواسير المص أى فى المنطقة بين الدعامات وبعد بوابات المص مما قد يستدعى تعميق الفرش بعمل ميول للبشة فى المنطقة بعد بوابات المص وحتى مدخل مواسير المص لزيادة مسطح القطاع المائى للوصول بالسرعة القصوى إلى الحد الذى لا يتجاوز هذه القيمة القصوى وذلك لتمكين العمالة اليدوية من سحب الحشائش من أمام مواسير المص وعلى شبك الأعشاب الذى لا يزيد ميله مع الأفقى عن (٦٠°).
- السرعات القصوى فى حوض الطرد قد تزيد قليلا عن مثيلاتها أمام مداخل مواسير المص وذلك للتغيير فى أعماق المياه بحوض الطرد عنها بحوض المص حيث دائما ما تكون عروض الفتحات بين الدعامات واحدة فى حوض المص والطرد.

٩-١٤ شبك الأعشاب

٩-١٤-١ مواقع شبك الأعشاب

لما كانت محطات الطلمبات (سواء أكانت لأغراض الرى أو للصرف) تعمل على رفع المياه من المجارى المائية التى تنمو الحشائش بها بأنواعها المختلفة فإنه يلزم إنشاء سياجات من شبك الأعشاب لحماية وحدات المحطات.

السياج الأول

يكون بحوض المص وقبل دخول المياه إلى بوابات المص ويتكون من شبك أعشاب مائل بزاوية (٦٠° إلى ٧٠°) مع الأفقى قد تكون بعرض مجرى المص كله ولها منشأ خاص منفصل عن حوض مص المحطة من الناحية الإنشائية أو يتصل فرشه بفرش حوض المص بفاصل مانع للمياه فى حالة حساب طول فرشة مع فرش المحطة لمقاومة خط الإنحدار الهيدروليكى ويكون لهذا السياج بلاطة أفقية من الخرسانة المسلحة (رصيف) بعرض يساوى المسقط الأفقى لشبك الأعشاب ولا يقل عن (٣ متر) وذلك لإمكان وضع الأعشاب المتجمعة فوقه كما أن وحدات شبك الأعشاب يتم إصلاحها وتنظيفها فوق هذا الرصيف.

وقد يتم حمل هذا الرصيف على أعمدة منفصلة أو مد الدعامات والأكتاف بنفس عروضها وإرتفاعها لحمل الرصيف وتثبيت شبك الأعشاب الأول بمجرى المص عليها.

السياج الثاني

وينفذ أمام مدخل مواسير المص مباشرة ولا يزيد ميله عن (٦٠°) مع الأفقى ويلزم أن يتوافر له رصيف علوى فوق مواسير المص لا يقل عرضه عن (٣ متر) ويجب أن يتم تنفيذ شبك الأعشاب عموما من خوص من الحديد الصلب لايزيد البعد بينها عن (٥ سم) وقطاعاتها حسب المتطلبات التصميمية الإنشائية لشبك الأعشاب وتنفذ من وحدات منفصلة كل وحدة بعرض من (١٥ إلى ٢٠) سم لإمكان رفعها وسحبها فوق رصيف شبك الأعشاب لإصلاحها وعمل الصيانة اللازمة لكل من هذه الوحدات المنفصلة. وفى

المحطـات الهامـة ذات التصرفات الكبيرة تزود شبكات الأعشاب بمعدات ميكانيكية تتحرك فوق الرصيف العلوى فـى الإتجاه العرضـى بين الوحدات لسحب الأعشاب المتجمعة فوق الشبك إلى أعلى ووضعها فى أوعية خاصة يتم نقلها إلى أحد جانبى مجرى المص لرفعها بعيدا عن موقع المحطة أولا بأول ويتم إعداد المواصفات الخاصة لشبك الأعشاب الميكانيكى ضمن المحطة الميكانيكية والكهربائية.

٩-١٤-٢ فواقد ضغط المياه خلال شبك الأعشاب

تحسب الفواقد فى ضغط المياه خلال شبك الأعشاب (H_{loss}) بالقدم طبقا للمعادلة التالية (٩-٤) وذلك حسب ما هو موضح بالشكل (٩-٥).

$$H_{Loss} = \alpha \, \text{Sin} \, \theta \, \frac{1.33 \, \text{a} \, \text{v}^2}{2g \, \text{x} \, \text{b}} \qquad \text{(in feet)} \qquad (9\text{-}4)$$

حيث

α = معامل سريان ويتوقف على شكل قطاع الأسياخ المكونة للشبكة (جدول ٩-٢)

a = سمك قطاع سيخ شبك الأعشاب عموديا على إتجاه سريان المياه (بوصة)

b = المسافة بين الأسياخ بالبوصة

v = سرعة سريان المياه خلال الشبك (قدم / ثانية)

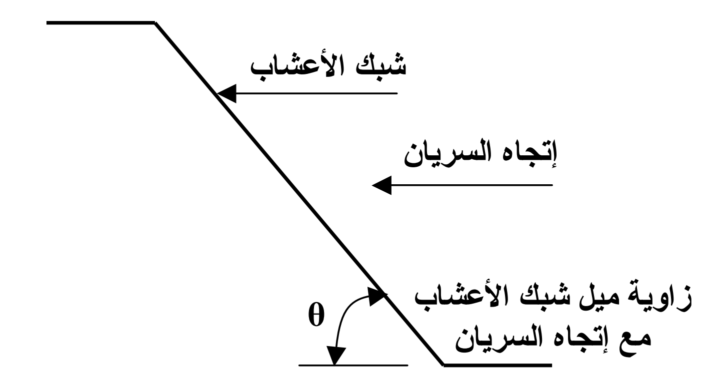
θ = زاوية ميل شبك الأعشاب مع إتجاه سريان المياه

g = عجلة الجاذبية (قدم / ثانية^2)

والجدول (٩-٢) يبين العلاقة بين معامل السريان α وشكل قطاع أسياخ الشبك.

جدول (٩-٢) العلاقة بين المعامل (α) وشكل أسياخ شبك الأعشاب

قطاع سيخ الشبك	معامل السريان α
إتجاه السريان (b_1, α)	2.42
إتجاه السريان (α)	1.83
إتجاه السريان (α)	1.67
إتجاه السريان (α)	1.03
إتجاه السريان (α)	0.93
إتجاه السريان (α)	0.76
إتجاه السريان (α)	1.79



شكل (٩-٥) شبك الأعشاب فى محطات الطلمبات

٩-١٥ البوابات الحديدية لمحطات الطلمبات

تزود كل وحدة من وحدات محطة الطلمبات بمجموعة من البوابات المزدوجة تتكون كل مجموعة من بوابتين متتاليتين بين دعامتين للتحكم فى قفل وحدة من وحدات المحطة قفلا تاما محكما. والمسافة بين كل زوج من وحدات البوابات (١ متر) والبعد بين البوابة الأولى وبداية الدعامة أو الكتف لا يقل عن (٢ متر) جهة المص. وتعمل هذه البوابات لقفل حوض المص بين دعامتين لعمل الصيانة لأى من وحدات المحطة أثناء تشغيل باقى الوحدات. وكذلك يتم قفل حوض الطرد بإستعمال بوابتى الطرد المتماثلتين فى العروض لبوابتى المص.

تزود كل من بوابات المص وبوابات الطرد بونش يتحرك فوق جميع الوحدات لنقل البوابات من مواقع تخزينها على أحد جوانب حوض المص والطرد إلى الموقع المراد نقله لعمل الصيانة لأى وحدة من وحدات المحطة. ويلزم أن تفى مقاسات كل بوابة بالأبعاد المحددة على الرسومات الميكانيكية كما يلزم أن تعمل البوابتان المتتاليتان سواء بالمص أو بالطرد على قفل المياه قفلا محكما لفتحة الوحدة المراد عمل الصيانة لها. ويتم تصنيع البوابات من كمرات رئيسية وكمرات ثانوية من الحديد المشغول وألواح من الصاج لا يقل سمكها عن (٦ مم) شكل (٩-٦) ويجب مراعاة الإعتبارات التالية عند تصميم البوابات وعناصرها المختلفة :

يراعى التباعد بين الكمرات الرئيسية وبعضها وبين الكمرات الثانوية وبعضها (شكل ٩-٦) بحيث يكون توزيع الأحمال الناتجة من ضغوط المياه على هذه الألواح فى الإتجاهين .

يحدد سمك هذه الألواح من الحسابات التصميمية الإنشائية طبقا للكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية مع زيادة السمك بمقدار (١ مم) لمقاومة الصدأ بالمجارى المائية ويمكن تحديد السمك المبدئى للألواح الإسترشادية بإستخدام المعادلة (٩-٥) التالية :

$$t = a\sqrt{\frac{\phi\, p}{2\,S\,(1+n^2)}} + 1\,\text{mm} \qquad (9\text{-}5)$$

حيث

$$n = \frac{a}{b} = \frac{\text{البحر فى الإتجاه القصير}}{\text{البحر فى الإتجاه الطويل}}$$

p = ضغط المياه مقاسا عند محور البحر لشريحة من الصاج تحت التصميم (كجم / سم^2)
s = الإجهادات المسموح بها فى الإنحناء للحديد المستخدم (كجم / سم^2)
Φ = معامل يتوقف على نظام إرتكاز جوانب جسم البوابة
= ١,١٥ للصاج حر التثبيت (Free) من جهتين
= ١,٠٠ للصاج حر الدوران (Hinged) من جهتين
= ٠,٧٥ للصاج حر الدوران (Hinged) من أربعة جهات

الكمرات الثانوية

وهى الكمرات الرأسية بالبوابات وتكون مرتكزة على الكمرات الرئيسية الأفقية ويتم تصميمها طبقا للكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
Egyptian Code of practice for steel construction and bridges

الكمرات الرئيسية

وهى الكمرات الأفقية التى تحدد عرض البوابة ويحدد عددها والمسافات البينية بينها بتقسيم منحنى ضغط المياه الكلى على البوابة إلى أجزاء متساوية فى المساحة ويحدد موقع كل كمرة بحيث تقع فى مركز ثقل مساحة الجزء ويتم حساب عزم الإنحناء الواقع على كل كمرة رئيسية حسب الشكل (٩-٧).

يمكن تقدير وزن البوابة الواحدة بالطن مبدئيا بإستخدام إحدى المعادلتين التاليتين :

$$W = 0.055\ A^{3/2} \qquad (9\text{-}6)$$

$$W = 0.064\ [(H_1\ S^2)^{1/2}\ - 1]\ A \qquad (9\text{-}7)$$

حيث
W = الوزن التقديرى للبوابة بالطن
A = مساحة البوابة (العرض x الإرتفاع الكلى للبوابة) بالمتر المربع

H_1 = ضغط عمود المياه عند المحور الأفقى للبوابة بالمتر
S = عرض البوابة (عرض الفتحة + مقدار دخول البوابة فى الدعامات والأكتاف) بالمتر

ويزاد هذا الوزن التقديرى بنسبة ٣٠ % للحصول على الوزن الكلى للبوابة ثم يضاف إليه نسبة ٢٠ % من هذا الوزن الكلى للأخذ فى الإعتبار وزن الأجزاء الإضافية وبالتالى يكون وزن البوابة المستخدم فى الحسابات = [١,٣ + ٠,٢٠ x ١,٣] x الوزن المستنتج من إحدى المعادلتين (٩-٦) أو (٩-٧).

حمولة وتصميم ونش رفع البوابات

بعد تحديد الوزن الكلى للبوابة يتم حساب المقاومة الناتجة عن إحتكاك جوانب البوابة بمجارى البوابة بالجانبين ومقدارها T حيث :

$$T = \mu P$$

$$= \mu \frac{H'^2\ S}{2} \qquad (9\text{-}8)$$

حيث

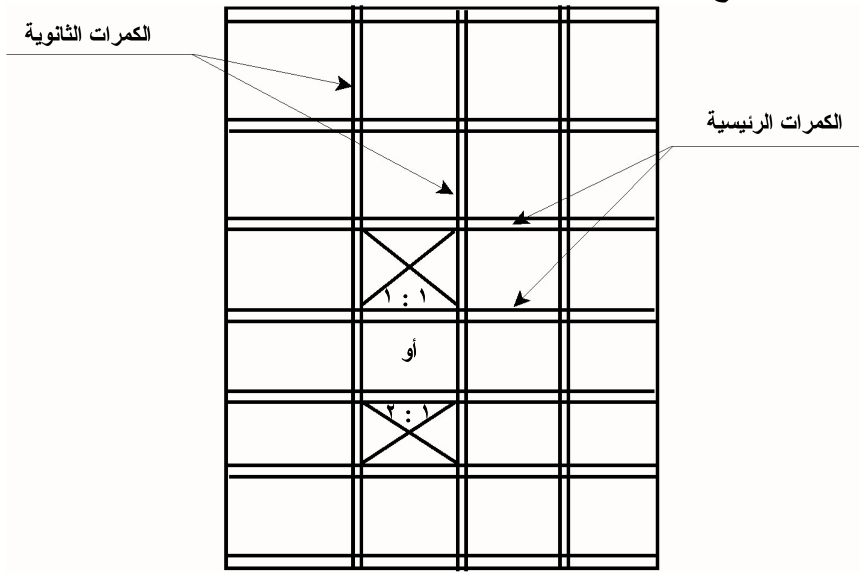
P = قوة ضغط المياه الأفقية على البوابة
μ = معامل الإحتكاك بين جسم البوابة وخطوط إرتكازها على الدعامات ويقدر بما بين (٠,٣ إلى ٠,٥)
H´ = أقصى إرتفاع للمياه أمام البوابة

وبالتالى يمكن حساب الحمولة الكلية لونش رفع البوابات من المعادلة :

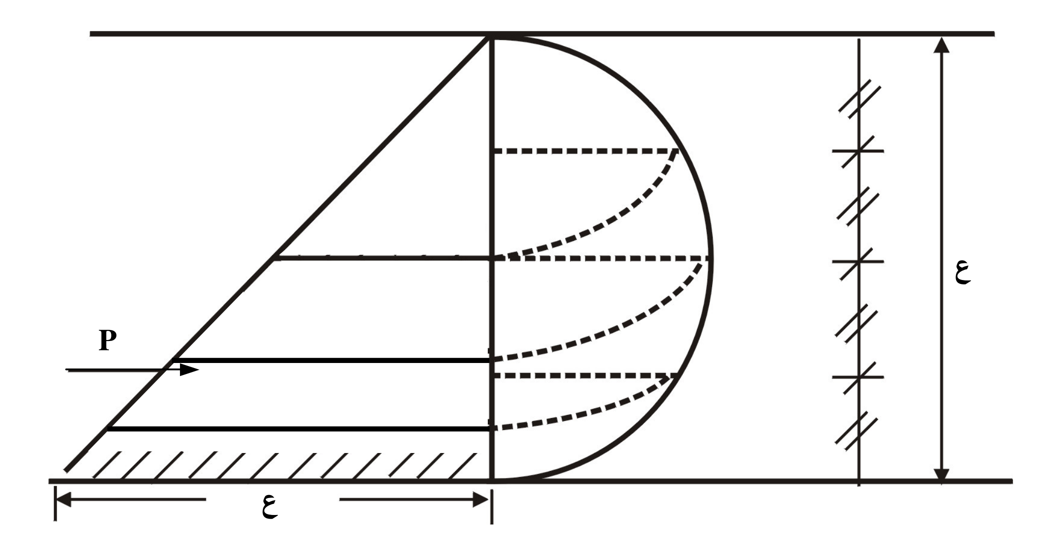
$$F = T + W (1 + K) \qquad (9\text{-}9)$$

حيث
K = معامل تتراوح قيمته بين (٠,٢٥ - ٠,٥٠)
F = الحمولة الكلية لونش رفع البوابات

وعليه يتم تصميم الونش بالأبعاد والمقاسات التى تفى بإشتراطات التشغيل لرفع ونقل البوابات بين الدعامات ونقلها إلى مواقع التخزين على أحد جانبى المحطة.



شكل (٩-٦) البوابات الحديدية لمحطات الطلمبات



شكل (٩-٧) توزيع ضغوط المياه على الكمرات الرئيسية الأفقية للبوابات وحساب عزوم الإنحناء عليها

٩-١٦ مجارى التهريب لمحطات الطلمبات By-Passes

تزود محطات الطلمبات وخاصة محطات طلمبات الصرف الزراعى بمجرى تهريب عبارة عن وحدة من الوحدات بدون معدات ميكانيكية وبمنسوب ثابت لقاع مجرى الوحدة بين دعامتين ويركب على هذا المجرى مجموعتان من البوابات (زوجان بمجرى الطرد وزوجان بمجرى المص). ويعمل مجرى التهريب على تصريف مياه المص إلى الطرد وذلك فى حالة إنقطاع التيار الكهربائى أو إنخفاض الجهد للتيار المغذى لوحدات المحطة والذى قد يحدث ويستمر لعدة ساعات تكون نتيجتها توقف المحطة وحدوث إزدحام للمياه بمجرى المص قد يتسبب عنه غرق لموقع المحطة وحدوث طفح لشبكة المصارف التى تغذى المصرف الرئيسى المغذى للمحطة. وتتحدد أبعاد ومناسيب مجرى التهريب طبقا لحالة موقع كل محطة وإمكانية حدوث الغرق لموقع المحطة فى حالة إنقطاع التيار الكهربائى أو هبوط الجهد الكهربائى.

٩-١٧ إحتياطات تنفيذ وإنشاء المحطات سواء للرى أو للصرف

عند إنشاء وتنفيذ محطات الطلمبات للرى أو للصرف فإنه يراعى تنفيذ الإحتياطات التالية فى أعمال الحفر والردم والتجفيف :

٩-١٧-١ أرانيك الحفر بمواقع المحطات

يتم الحفر لأساسات المحطات فى طبقات التربة المختلفة طبقا للأبعاد والمناسيب المطلوبة والتى تحقق المتطلبات الآتية :

- عمل الميول اللازمة لجوانب الحفر طبقا لنوع التربة والتى لا تقل عن (١ : ١).
- ترك مسطاح بعرض لا يقل عن (١ متر) حول مسطح خرسانة الأساسات مع عمل خندق عرض قاعه (٠,٥٠ متر) لتجميع مياه الرشح يكون منسوب قاعه أوطى من منسوب أسفل خرسانة الأساسات بما لا يقل عن (٠,٢٥ متر) وبميول جانبية للخندق (١ : ١) وإنحدار منتظم لقاع خندق الصرف إلى بيارات طلمبات سحب المياه فى أركان صندوق خرسانة الأساسات من الخارج.
- ترك مسطاح خارجى من الحافة الخارجية لخندق مياه الرشح لا يقل عرضه عن (٠,٥٠ متر) بعده يتم قطع التربة بميل لا يقل عن (١ : ١) وبإرتفاع لا يزيد عن (٢ متر) ثم عمل مسطاح لا يقل عن

(١ متر) ويكرر هذا حتى الوصول إلى سطح الأرض الطبيعية بموقع العمل. ويلزم أن يتم نقل وتشوين ناتج الحفر إلى مسافة لا تقل عن (٣٠ متر) من الحافة النهائية لقطاع الحفر عند منسوب أرض الزراعة بموقع حفر المحطة.

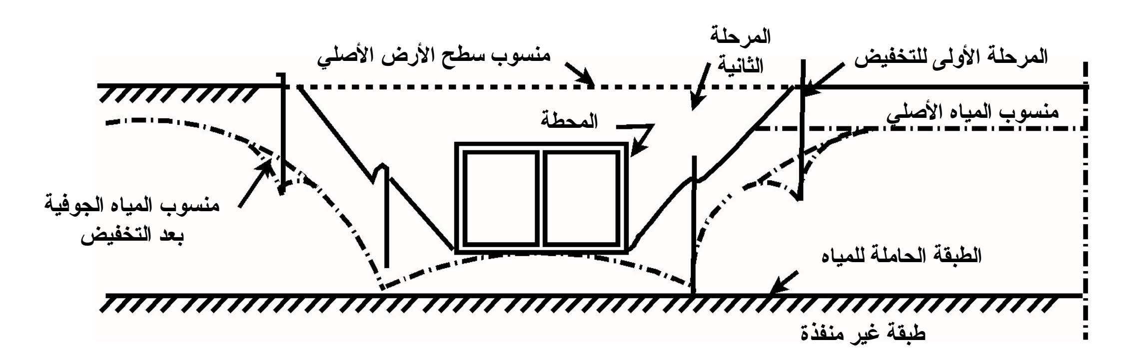
٩-١٧-٢ الحفر الهندسي

يعرف الحفر الهندسى اللازم لوضع أساسات أى من المحطات بأنه المساحة الكلية للفرش عند المنسوب السفلى مضروبا فى متوسط الإرتفاع بين هذا المنسوب ومنسوب أرض الزراعة بالموقع ودون إحتساب أى ميول لأورنيك الحفر ويجب عمل ميزانية شبكية للموقع قبل الحفر.

٩-١٧-٣ تجفيف الموقع

يلزم تجفيف موقع المحطة وحتى منسوب قاع التأسيس والمحافظة على بقائه جافا تماما سواء فى مراحل الحفر أو فى مراحل وضع خرسانات الأساسات وعناصر المحطة التالية لها من دعامات وأكتاف وما بينهما من مواسير وكوابيل وحوائط عرضية. ويتم ذلك بإحدى الطرق الثلاثة التالية :

- النزح السطحى المستمر طوال فترة العمل فى الحفر والإنشاء.
- النزح بإستخدام مجموعة من الآبار الأبرية حول أساسات المحطة فى مجموعة من صف أو صفين أو ثلاثة صفوف متتالية الأشكال (٩-٨) ، (٩-٩) ، (٩-١٠).
- النزح بإستخدام مجموعة من آبار التجفيف العميقة ذات التصرفات المناسبة للمحافظة على خفض منسوب المياه الجوفية بالموقع إلى المنسوب الذى يحافظ على جفاف موقع العمل طوال فترات التنفيذ ويرجع للباب العاشر من الكود الخاص بالآبار لتصميم هذا النوع من الآبار العميقة وكذلك إلى الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

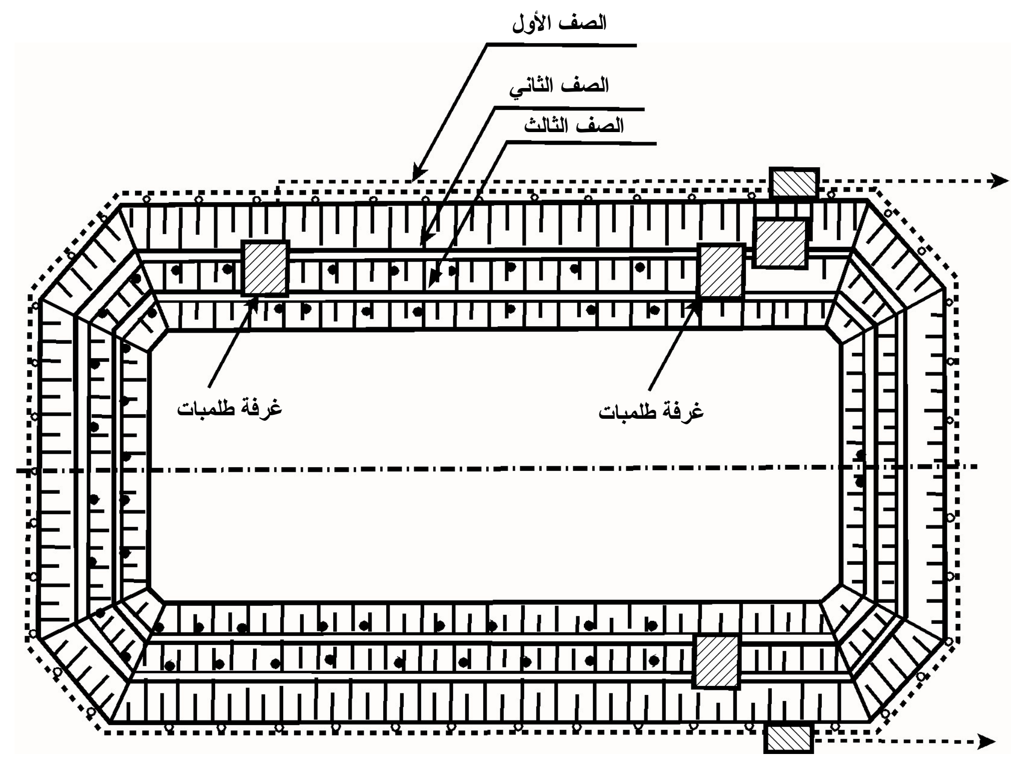


شكل (٩-٨) تخفيض المياه على مرحلتين

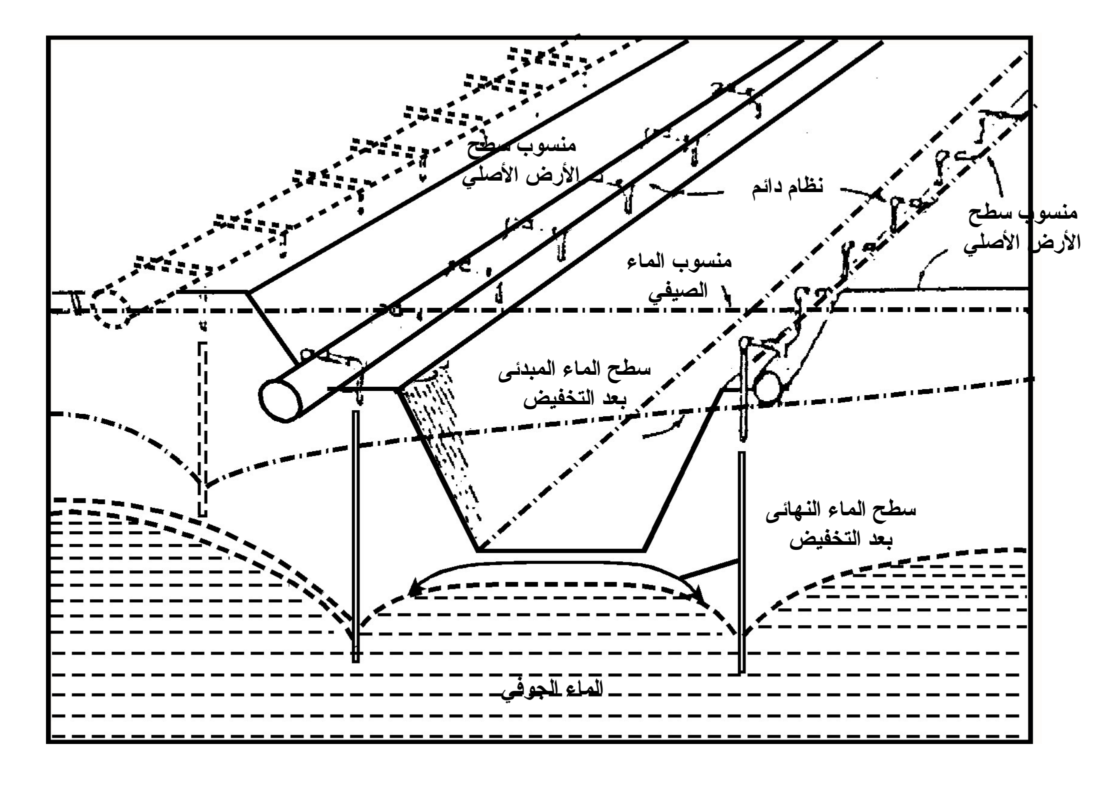
٩-١٧-٤ أورنيك الردم

يتم حساب مكعبات الردم اللازم حول منشأ المحطة بعد نهو صب جميع كميات الخرسانات أسفل منسوب أرض الزراعة ويعرف الردم بأنه الفرق بين كميات الحفر الفعلى الذى يتم حسابه طبقا للأورنيك الوارد بالبند ٩-١٧-١ وبين المسقط الأفقى للفرش مضروبا فى إرتفاعه عند المناسيب المختلفة.

وفى حالة إتخاذ الحفر الهندسى أساسا للمحاسبة على كميات الحفر فإنه يلزم إعتماد أورنيك الحفر الطبيعى قبل البدء فى إجراء أعمال الحفر بالموقع لإتخاذه فيما بعد أساسا لتحديد كميات الردم الواجب المحاسبة عليها عند نهو أعمال الخرسانات.



شكل (٩-٩) كروكى يوضح مواقع البيزومترات (الآبار الأبرية)



شكل (٩-١٠) البيزومترات المؤقتة والدائمة

٩-١٨ المراجع

1. Davis, C.V. and Sorensen, K.E., "Handbook of Applied Hydraulics", McGraw-Hill, New York, USA, (1996).

2. Karassik, J.J., (Editor),"Pump Handbook", Mc Graw-Hill, New York, U.S.A, (1986).

3. Novak, P., Moffat, A.I., Nalluri, C. and Marayanan, R.,"Hydraulic structures", E & FN Spon, London, UK, (1996).

4. Sanks, R.L. "Pumping Station Design", Butter worth-Heinemann, Oxford, UK, (1998).

5. Stewart, H.L., "Pumps", Macmillan, NewYork, USA, (1986).

6. Turtom, R.K.,"Introductory Guide to Pumps and Pumping Systems", Mechanical Engineering Publications, (1993).

7. Volk, M.W.,"Pump Characteristics and Applications". M. Dekker, New York, USA, (1996).

الباب العاشر
الآبار Wells

١٠-١ الدراسات التمهيدية قبل حفر الآبار

١٠-١-١ مقدمة

تعتبر الآبـار من المنشآت الهامة فى مجال مشروعات الرى والصرف لأنها الوسيلة الأساسية للتعامل مع المياه الجوفية ، وتعرف المياه الجوفية بأنها المياه تحت السطحية والتى تتواجد أسفل سطح المياه الحر فى التربة والتكوينات الجيولوجية بحيث تكون كاملـة التشبع ، وبواسطة الآبـار يتم ضخ المياه الجوفية إلى سطح التربة بهدف استغلالها فى أغراض الرى وغيرها أو للعمل على تخفيض منسوب سطح المياه الحر فى الأرض الزراعية كوسيلة للصرف - وهو ما يعرف بالصرف الرأسى Vertical Drainage كما تستخدم الآبار فى نقل المياه السطحية الزائدة أو غير المرغوبة إلى باطن الأرض وهى التى تعرف بآبار الشحن Recharge Wells .

وتعتبـر المياه الجوفية مصدرا أساسيا يتوقف توافره على المكـان والزمان وهـى أحد عناصـر الدورة الهيدرولوجية ، لذلك ترتبط مع العناصر الأخرى لهذه الدورة خاصة هذا الجزء منها الذى يتسرب إلى طبقات الأرض مكونا مصدر التغذية للخزانات الجوفية. وبالتالى فإن استغلال المياه الجوفية فى المناطق المروية والوديان يتم على وجه العموم دون حدوث مشاكل بسبب توفر الشحن الطبيعى ، ولكن قد تظهر بعض المشاكل إذا حدث قصور فى الدراسات الهيدروليكية أو فى تصميم آبار السحب مما قد ينتج عنه أثار ضارة مثل تداخل منـاطق السحب للآبار Interference of Wells أو تدهور نوعية المياه بسبب ارتفاع مخـروط المياه المالحة Upconing أو تداخل ميـاه البـحر فى المنـاطق الساحلية Sea Water Intrusion . والطبقات الحاملة للمياه الجوفية Aquifers تسمح بنقل المياه من مناطق التغذية إلى مناطق السحب ، وتتوقف سهولة حركة المياه ووصولها إلى آبار السحب على معاملات التوصيل Transmissivity لهذه الطبقات ، كما تتوقف كميات المياه التى يمكن ضخها من الخزان الجوفى على معامل التخزين Storativity .

وتحتـاج دراسـات المـياه الجوفـية إلـى العديـد مـن المـبادئ الأساسـية فـى الجيولوجـيا والجيوفيـزياء والهيدرولوجيا والفيزياء والكيمياء والرياضيات ومجموعة قوانين ميكانيكا الموائع التى تحكم حركة المياه خلال الأوساط المسامية بجانب تقنيات النماذج الرقمية Numerical Models وتحليل النظم System Analysis وعلى ذلك فإنه قبل الشروع فى حفر حقل آبار لاستغلال المياه الجوفية فإنه من اللازم إجراء إستقصـاءات أولـية للخـزان الجوفـى Exploration ، يتـبعها تقيـيم لإمكانـيات الخـزان الجوفـى Evaluation ثم بعد ذلك استغلال وإدارة المياه الجوفية Exploitation .

١٠-١-٢ الإستقصاءات الأولية للخزان الجوفى Groundwater Exploration

قبل وضع خطة العمل لإجراء الإستقصاءات الحقلية فلابد من الاستفادة من المعلومات والبحوث السابقة بحيث يتم حصر جميع البيانات والدراسات المتاحة وتلخيصها لتصبح أساسا لتخطيط الأعمال التكميلية المطلوبة. كما أن الزيارات الاستطلاعية لمناطق الدراسة تكون فى غاية الأهمية لبيان الظروف الحقلية والعوائق والبدائل الممكنة لطرق تجميع المعلومات التكميلية.

١٠-١-٣ نوعية البيانات المطلوبة
عند إجراء إستقصاءات هيدرولوجية لإحدى المناطق تمهيدا لعمل التصميمات لحقول آبار لمشروعات رى وصرف كبيرة فإنه يلزم تجميع البيانات التالية :

١٠-١-٣-١ بيانات مناخية
وتتضمن معدلات هطول الأمطار ودرجات الحرارة والبخر والنتح والرياح وسطوع الشمس.

١٠-١-٣-٢ نظام المياه السطحية
وتشتمل على مياه الرى والصرف والأنهار والبحيرات والعيون بالإضافة إلى نوعية المياه بها جميعا.

١٠-١-٣-٣ الخرائط والقطاعات
مثل الخرائط الطبوغرافية والجيولوجية (القطاع الجيولوجى - Lithology التكوين - Structure التتابع الطبقى - Stratigraphy) ، والخرائط الهيدرولوجية (مواقع الآبار – سطح المياه الحر - Water Table الضاغط البيزومترى - Piezometric Head نوعية المياه - مناطق الشحن والاستنزاف)، وأنواع التربة والغطاء النباتى والاستعمال الحالى والمستقبلى للأرضى ومصادر وأنواع الملوثات.

١٠-١-٣-٤ حصر الآبار الموجودة
وتتضمن مواقع الآبار ونوعها وتاريخ الحفر والعمق والقطر والجس الجيوفيزيائى ومناسيب المياه الإستاتيكية (بدون ضخ) والمناسيب الديناميكية (مع الضخ) والتصرفات والسعة النوعية للبئر Specific Capacity ونوعية المياه.

١٠-١-٣-٥ بيانات الطبقة الحاملة Aquifer
وتشمل الطبقة المحصورة Confined وغير المحصور Phreatic والسمك والعمق والحدود Boundaries والمعادلات الهيدروليكية وعلاقة المياه الجوفية بالمياه السطحية ونماذج تماثل الطبقة الحاملة.

١٠-١-٤ تجهيز البيانات وعرضها Data Processing and Presentation

١٠-١-٤-١ تجهيز البيانات Data Processing
نظرا لأن البيانات والمعلومات المجمعة من الحقل مباشرة أو من أعمال ودراسات سابقة تكون متعددة ومتنوعة فإنه يلزم حفظها وتداولها وفق نظام دقيق مثل قاعدة المعلومات على الحاسب الآلى - بجانب التحقق من صلاحية البيانات Reliability كما يلزم أن تسمح قاعدة المعلومات بتداول البيانات مثل القراءات الدورية لمناسيب المياه الجوفية التى يمكن استدعاؤها فى صورة منحنيات تغير المنسوب مع الزمن أو حتى على هيئة خرائط كنتورية لمناسيب المياه الجوفية فى أزمنة محددة.

١٠-١-٤-٢ عرض البيانات Data Presentation
يتم تحليل البيانات وتقييمها باستعمال الخرائط والقطاعات ، كما يمكن استخلاص الأشكال والرسومات من نظام قاعدة المعلومات ليوفر كثيرا من الجهد ويجب أن يكون مقياس الرسم لهذه الأشكال واحدا حتى يمكن إجراء مقارنات Interpretation عن طريق التطابق أو غير ذلك.

وتشمل خرائط ودراسات المياه الجوفية والقطاعات ما يلى :
- خرائط طبوغرافية وصور جوية.
- خرائط وقطاعات جيولوجية.
- خرائط كنتورية لمناسيب المياه الجوفية.
- خرائط عمق سطح المياه الجوفية الحر.
- المخطط العام لشبكات الرى والصرف.
- قطاعات الأنهار والقنوات الرئيسية والمصارف.
- خرائط كنتورية لسقف وقاع الطبقة الحاملة للمياه.
- خرائط كنتورية تبين الخواص الهيدروليكية للطبقات الحاملة للمياه.
- خرائط تبين مقدار وتوزيع السحب من المياه الجوفية.
- خرائط تبين نوعية المياه الجوفية (الملوحة والتلوث).
- خرائط استعمال الأرض Land Use .

١٠-١-٥ نظام شبكة التقييم Setup of Evaluation Network

تعتبر الإستقصاءات الحقلية عملية مستمرة تبدأ قبل إجراء الدراسة وتستمر أثناء مراحلها المختلفة وإلى ما بعد الانتهاء من تنفيذ حقل الآبار ، ومن الممكن تحسين القطاعات والخرائط والهيدروجرافات خلال هذه المراحل. وعلى سبيل المثال فإنه فى حالة عمل تماثل لأحد الخزانات الجوفية ومع معايرة النماذج الرقمية فإن نتائج تحليل الحساسية Sensitivity Analysis قد تشير إلى الحاجة إلى أعمال حقلية تكميلية وتجميع المزيد من البيانات. وبجانب ذلك فإن شبكة المراقبة Monitoring تكون ضرورية لتقييم مشروعات المياه الجوفية.

ويمكن تعريف شبكة المياه الجوفية على أنها منظومة من نقاط المراقبة للزمان والمكان تقدم معلومات يعتمد عليها فى التخطيط والتطوير والإدارة لمصادر المياه الجوفية أو أى أنشطة أخرى مرتبطة بها. ويلزم أن تمتد شبكة التقييم إلى خارج حدود المنطقة التى يتم دراستها بالقدر الذى يمكن معه تغطية أى مساحات أخرى يحتمل أن تتأثر - كما أن ذلك يعطى بيانات عن حركة المياه الجوفية الداخلة والخارجة عبر حدود المنطقة.

وتعتمد كثافة شبكة التقييم وتكرارية الأرصاد على حالة المنطقة والهدف من التقييم والحدود التى تفرضها الميزانية المتوفرة ، ومن الواجب فى حالة جمع أرصاد مرتبطة ببعضها البعض أن يتم ذلك فى نفس الوقت بقدر الإمكان. ومن أمثلة البيانات والمعلومات الواجب رصدها بواسطة شبكة التقييم فى حالة مشروع رى أو صرف مرتبط بالمياه الجوفية ما يلى :
- نظام التشغيل الفعلى للآبار.
- منسوب الضاغط الأستاتيكى والديناميكى للمياه الجوفية.
- عمق منسوب المياه الجوفية عن سطح الأرض.
- نوعية المياه الجوفية.
- مناسيب وتصرف شبكة المياه السطحية (إن وجدت) بالمنطقة.

١٠-١-٦ الإستقصاءات الحقلية

هناك تقنيات مختلفة يمكن بواسطتها جمع معلومات عن تواجد المياه الجوفية ونوعيتها. ويمكن رصد مناسيب المياه الجوفية من الآبار كما يمكن أخذ عينات مياه منها. كما أن قياسات تصرفات ونوعيات المياه السطحية تعطى بيانات عن ارتباطها بالمياه الجوفية ، وكذلك فإن الاستشعار عن بعد من الطائرات

والأقمار الصناعية قد أصبح ذا فائدة متزايدة لفهم أحوال المياه تحت السطحية. وتعطى تقنيات الجيوفيزياء شواهد غير مباشرة عن المياه الجوفية.

١٠-١-٦-١ تجميع البيانات الحقلية

قياس مناسيب المياه الجوفية

يتم قياس مناسيب المياه الجوفية بالنسبة لمنسوب ثابت يسمى مستوى المقارنة Reference Level - وقد يكون متوسط منسوب سطح البحر - ويبين الشكل رقم (١٠-١) طرق قياس مناسيب المياه الجوفية.

قياس نوعية المياه الجوفية

يمكن إعداد خرائط جيوكيميائية عن طريق أخذ عينات من مياه الآبار وتحليلها لعناصرها الكيميائية ، وتكون لمثل هذه الخرائط أهمية كبيرة فى توضيح الارتباط بين الخزانات الجوفية المتجاورة وحركة المياه الجوفية ونوعية التركيبات الجيولوجية وتوزيع المياه العذبة وشبه المالحة ويكفى لتر واحد من الماء لإجراء التحليل الكيميائى ويجب غلق الزجاجة وبداخلها عينة المياه بإحكام فور رفعها من البئر مباشرة وتخزينها فى مكان بارد ونقلها بعناية إلى المعمل للتحليل ، ويجب أخذ العينة من البئر بعد فترة من الضخ المستمر حتى تكون خالية من الملوثات.

قياس تصرفات ونوعية المياه السطحية

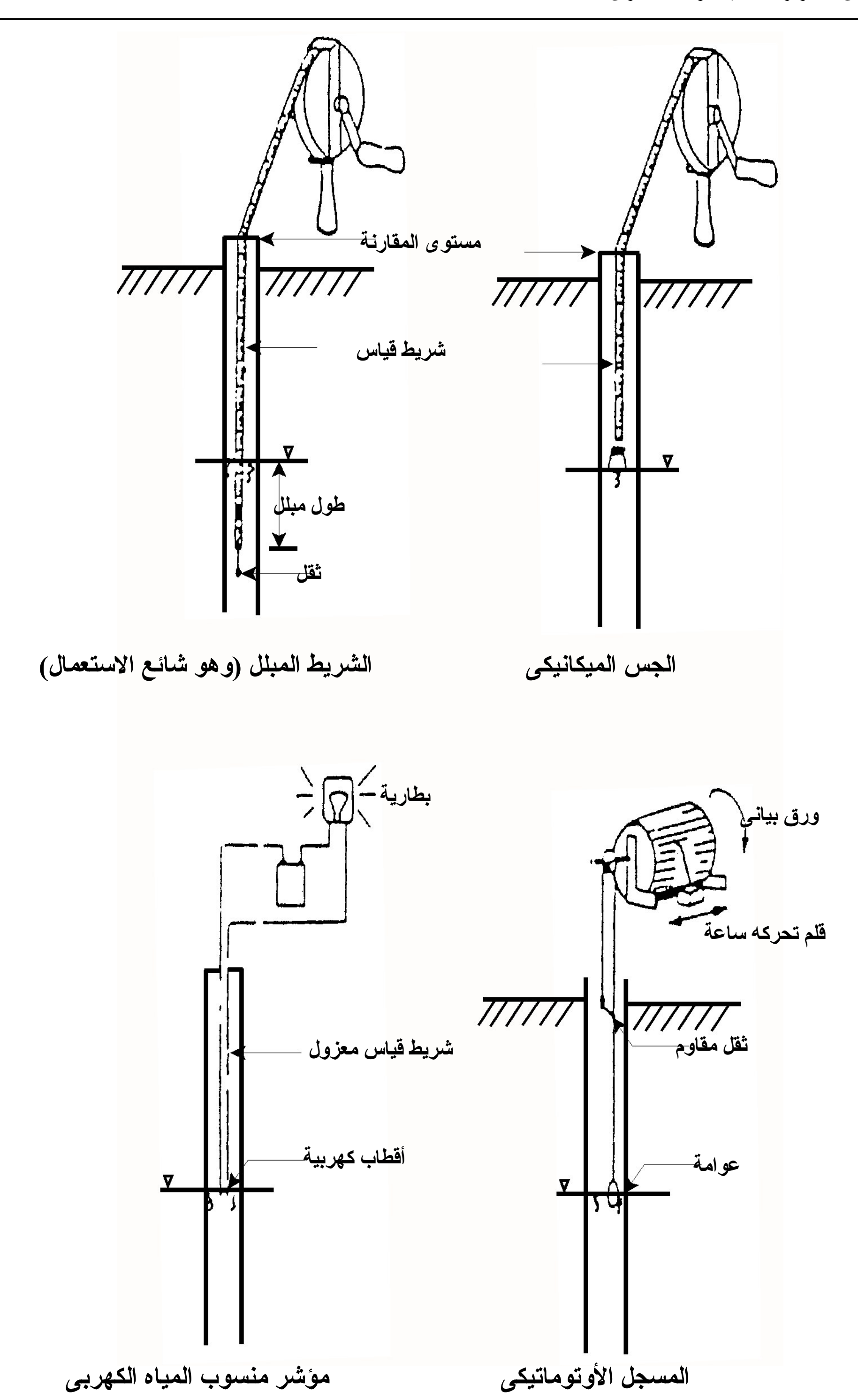
يجب قياس تصرفات المياه السطحية المختلفة المتصلة بالمياه الجوفية حيث أنها تساعد فى حساب الاتزان المائى للخزان الجوفى ويجب أيضا قياس نوعيه المياه السطحية ودرجة حرارتها وتوصيلها الكهربائى Electrical Conductivity .

١٠-١-٦-٢ طرق الاستشعار عن بعد Remote Sensing Techniques

تستخدم بيانات الاستشعار عن بعد لتصنيف سطح الأرض والتمييز بين نوعيات التربة وتحرى الظواهر الجيولوجية كما أنه يصبح ذا أهمية كبيرة فى حالة الإستقصاءات الإقليمية Regional Investigations

١٠-١-٦-٣ المساحة الجيوفيزيائية Geophysical Survey

تعتبر المساحة الجيوفيزيائية الطريقة العملية للتحرى عن الترسيبات المعدنية أو التركيبات الجيولوجية ، كما أن المساحة الجيوفيزيائية فوق سطح الأرض أرخص وأسرع طريقة عند مقارنتها بالحفر لاستكشاف التكوينات تحت السطحية. وأكثر الطرق شيوعا هى طريقة المقاومة الكهربية.



شكل (١٠-١) طرق قياس مناسيب المياه الجوفية

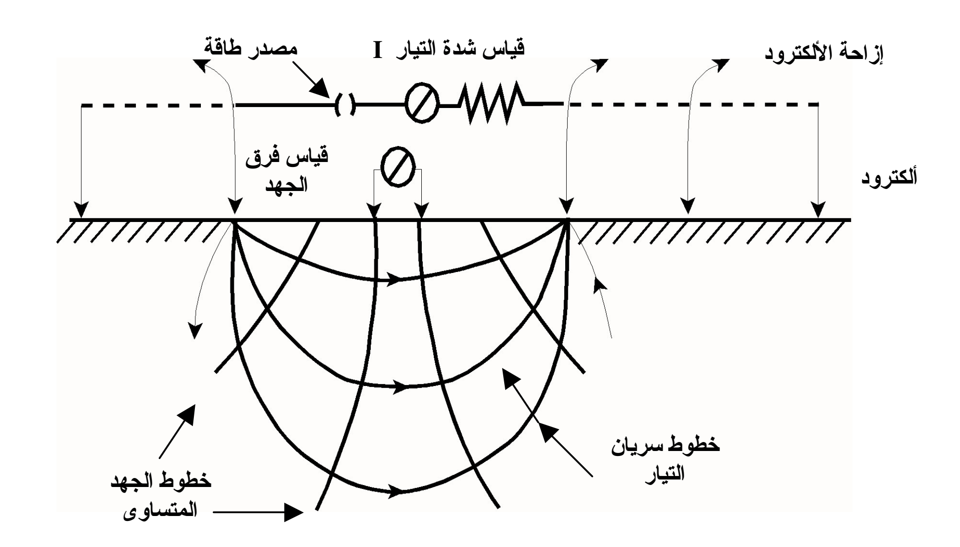
طريقة المقاومة الجيوكهربية Geo-Electrical Resistivity

فى هذه الطريقة يتم إمرار تيار كهربائى تحت سطح الأرض بواسطة قطبان كهربيان كما هو موضح بالشكل (١٠-٢) ويتم قياس فرق الجهد الكهربائى بواسطة قطبين كهربيين آخرين موضوعين على سطح الأرض أيضا ، ومع الربط بشدة التيار الكهربى فإنه يمكن قياس مقاومة جزء من التكوين تحت الأرضى، وبتغيير المسافة بين القطبين يمكن قياس المقاومة الظاهرية المختلفة للطبقات المتتالية تحت سطح الأرض.

١٠-١-٧ تقييم الخزان الجوفى Groundwater Evaluation

بعد أن يتم توصيف الأبعاد الهندسية للخزان الجوفى من حيث الامتداد المساحى والتتابع الطبقى وسمك وأعماق الطبقات الحاملة للمياه فإنه يجرى إختبار هذا الخزان للحصول على معلومات عن خواصه الهيدروليكية أى معامل التوصيل Transmissivity ومعامل التخزين Storativity . وإجراء تجربة إختبار البئر Well Test يعطى بيانات عن التصرف النوعى Specific Discharge للبئر بجانب معامل التوصيل للخزان الجوفى للمنطقة المحيطة مباشرة للبئر ، وفى هذه التجربة يكون المطلوب فقط بئر واحد للضخ.

أما تجربة إختبار الخزان الجوفى فهى تعطى بيانات عن كل من معامل التوصيل ومعامل التخزين وتحتاج إلى جانب بئر الضخ بئرين آخرين للملاحظة على الأقل على خط واحد وعلى أبعاد مختلفة من بئر الضخ. وتعطى هذه التجربة العلاقة بين تصرف البئر والهبوط الناتج فى مناسيب المياه الجوفية على أبعاد مختلفة من بئر الضخ وفى أوقات مختلفة. ويتم تحليل الأرصاد والقياسات اعتمادا على نوع الخزان الجوفى الذى تمت به تجربة الضخ ، ويقدم الفصل السابع تفاصيل تجارب الضخ.



شكل (١٠-٢) ترتيب شلومبرجر للجس الجيوفيزيائى بطريقة المقاومة الكهربية

١٠-١-٨ استغلال وإدارة المياه الجوفية
Groundwater Exploitation and Management

الطريق الصحيح لاستغلال المياه الجوفية يبدأ من حفر أول بئر ناجح وحتى التشغيل المكثف لنظام المياه الجوفية والذى يتحدد من خلال خطوات التعظيم Optimization Procedures وذلك مرورا بالمراحل المتتالية من الإستقصاءات الأولية ثم تقييم الخزان الجوفى حتى الاستغلال الأمثل.

وبعد أن يصبح تحديد مواقع الآبار الناجحة مسألة روتينية فإن استغلال الخزان الجوفى غالبا ما يتزايد بانتظام تزايد عدد الآبار الإنتاجية ، وهنا تصبح الاعتبارات الهيدرولوجية أمرا هاما من حيث المسافة بين الآبار ومقدار الرفع Pumping Lift والحدود القصوى للتصرفات التى يتحملها هذا المصدر المائى. وعندئذ يكون من الضرورى تحليل منظومة المياه الجوفية لتحديد خواص الطبقات الحاملة للمياه وتقدير متوسط الشحن السنوى وتكوين نموذج رياضى ، بهدف استغلال الخزان الجوفى على أساس متواصل Sustained Basis . ويعتمد أقصى تصرف متواصل على مقدار الشحن وعلى الاشتراطات الموضوعة مثل خطورة تداخل المياه المالحة وهبوط سطح الأرض وأقصى منسوب لانخفاض المياه الجوفية ، كما يدخل فى الاعتبار إمكان تلوث المياه الجوفية من الأنشطة الزراعية ومصادر التلوث الكيميائى والعمرانى والصناعي.

ولما كان من المستحيل إجراء تجارب على الخزان الجوفى لمعرفة مدى رد فعله للسياسات المستقبلية المقترحة لإختيار الأنسب منها ، فإنه يجرى استعمال النماذج الرياضية لتحقيق ذلك. ويمثل النموذج بمجموعة معادلات يعطى حلها سلوك المنظومة. وتعتبر الطرق الرقمية المعتمدة على الكومبيوتر الوسيلة الرئيسية فى الوقت الحالى لحل مسائل المياه الجوفية الإقليمية Regional ، ولا يتعرض هذا الكود للرياضيات والطرق الرقمية ، ويمكن الرجوع إلى المراجع العلمية المتخصصة فى هذا الشأن. ويمر النموذج عند تشكيلة بالمراحل التالية :

إعداد الخرائط الأساسية لمنطقة الدراسة ويبين عليها المجارى المائية الرئيسية والحدود وأوصافها وأنواع وخصائص الطبقات الجيولوجية.

تشكل شبكة Grid يظهر عليها المجارى المائية والحدود - ويتم توصيف نقاط الشبكة Nodes الواقعة على الحدود من حيث التصرف والضاغط.

إدخال البيانات Parameter Input

يتم إدخال قيمة العناصر المختلفة Parameters لكل نقطة Node فى الشبكة مثل معامل التوصيل ومعامل التخزين وسمك ومقاومة الطبقات نصف المنفذة وكذلك بيانات تضاريس سطح الأرض والأمطار ومواقع ومقادير الضخ.

معايرة النموذج Calibration

عندئذ يحسب النموذج مناسيب المياه الجوفية والاتزان المائى عند كل نقطة والتى يجرى مقارنتها بالمناسيب والتصرفات المقاسة. فإذا لم يحدث توافق بين المقادير المحسوبة والمقاسة فإنه يتم تعديل عنصر واحد ثم تعاد الحسابات ، وطريقة المحاولة والخطأ هذه التى تتبع للتوصل إلى تشابه مقبول مع الحقيقة تسمى عملية معايرة النموذج.

إختبار الحساسية Sensitivity Analysis

لبيان مدى حساسية النموذج لكل عنصر Parameter فإنه يجرى إختبار درجة تأثر النموذج بالتغير فى قيمة هذا العنصر ، ويكون لهذا البيان أهمية كبيرة للضبط الدقيق للنموذج. وعادة تتم المعايرة وإختبار الحساسية فى مرحلة واحدة.

تطبيقات النموذج Application

بمجرد الانتهاء من المعايرة يصبح النموذج صالحا للتطبيق بإجراء تجارب فعلية Production Runs وهذا يعنى أنه يمكن تمثيل أى أنشطة مستقبلية مثل زيادة معدلات الضخ من أبار جديدة على مناسيب

المياه الجوفية المحلية والإقليمية مما يساعد على تحديد مقدار الضخ الآمن Safe Yield ووضع المواصفات لتصميم الآبار.

التعظيم Optimization

وهذا يعنى تشغيل منظومة المياه الجوفية بطريقة تجعل النسبة بين الفائدة والتكلفة أكبر ما يمكن بشرط عدم تدمير المصدر المائى ومراعاة أى اشتراطات أخرى مثل نوعية المياه واستمرارية المصدر والنواحى البيئية والتداعيات الاجتماعية وتستخدم لذلك طرق تحليل المنظومة System Analysis .

١٠-٢ أنواع الآبار المستخدمة فى مشروعات الرى والصرف

١٠-٢-١ الآبار الإنتاجية Discharge Wells

البئر الإنتاجى عبارة عن ثقب يتم حفره رأسيا مخترقا التكوينات الجيولوجية حتى يصل إلى المياه الجوفية بحيث يسمح بدخول الماء من خلال فتحات (مصافى) توجد فى الجزء السفلى ومنها تصل إلى سطح الأرض.

ويتكون البئر الإنتاجى من الأجزاء الرئيسية التالية المبينة فى الشكل (١٠-٣).

١٠-٢-١-١ بيت المضخة Pump house

ويشيد من الطوب أو من الخرسانة ، وعادة يقام فوق البئر مباشرة لحماية رأس البئر ، وهو يضم بجانب المضخة أجزاء التركيبات الأخرى مثل لوحة التحكم وعداد المياه وأجهزة قياس الضغط.

١٠-٢-١-٢ رأس البئر

ويجرى إحكام غلقه عند سطح الأرض وتكون به ممرات محكمة للكابلات ولمواسير مراقبة منسوب المياه.

١٠-٢-١-٣ ماسورة البئرCasing

وتكون هى الوسيلة التى تنقل المياه الجوفية إلى سطح الأرض كما تعمل على احتواء المضخة.

١٠-٢-١-٤ المضخة

وهى تعمل على خلق الضاغط الهيدروليكى الذى يسبب حركة المياه إلى أعلا.

١٠-٢-١-٥ العازل الطينى Clay Seal

ويتم وضعه بين ماسورة البئر وجدران ثقب الحفرة فوق أعلى الطبقات الحاملة للمياه لمنع المياه السطحية من الوصول إلى المصافى.

١٠-٢-١-٦ المصافى Screen

وتتكون من ماسورة بها فتحات طويلة ضيقة (مشقبيات Slots) أفقية أو رأسية يدخل الماء من خلالها إلى البئر.

١٠-٢-١-٧ مصيدة الرمال Sand Trap
وهى ماسورة صماء توجد أسفل المصافى حيث تختزن الرمال أو أية حبيبات أخرى قد تنفذ من خلال المصافى.

١٠-٢-١-٨ أذرع التمركز Centralizers
وهى تحفظ ماسورة البئر والمصافى أثناء وضع الغلاف الزلطى والعازل.

١٠-٢-١-٩ الغلاف الزلطى
ويحقق وجود نطاق حول مصافى البئر ذى معامل نفاذية عال كما يعمل على أتزان الطبقة الحاملة للمياه ويقلل من ضخ حبيبات الرمال.

ويمكن تقسيم الآبار الإنتاجية من حيث العمق إلى آبار ضحلة يبلغ عمقها عشرات الأمتار أو آبار عميقة تصل إلى مئات الأمتار. وقد تخترق الآبار الإنتاجية طبقات حاملة للمياه محصورة Confined Aquifer ولها ضاغط ارتوازى Artesian يعلو سطح الأرض ، وفى هذه الحالة يكون تدفق البئر طبيعيا Natural Flowing Well ودون الحاجة إلى مضخة.

والبئر الإنتاجى يمكن استخدامه فى تخفيض منسوب المياه الجوفية فى المنطقة المطلوب تخفيض سطح المياه الجوفية فيها.

١٠-٢-٢ آبار الملاحظة Conservation Wells
تستخدم آبار الملاحظة فى رصد منسوب سطح المياه الجوفية الحر Water Table وتكون ذات أقطار صغيرة بالقدر الذى يسمح برصد منسوب المياه داخل البئر. ويتكون بئر الملاحظة من غلاف Casing ذى فتحات Slots على امتداد العمق للخزان الجوفى غير المحصور Unconfined Aquifer ويوضع فى ثقب الحفرة بدون أى محاولة للعزل بين الغلاف والخزان الجوفى.

١٠-٢-٣ البيزومترات Piezometers
تستخدم البيزومترات فى قياس الضاغط المائى فى "نقطة" داخل الخزان الجوفى ويتكون البيزومتر من غلاف له فتحات بطول محدود عند نهايته (١ - ٢ متر). ويثبت الغلاف بإحكام مع جدران ثقب الحفرة كما هو موضح فى الشكل (١٠-٤). وإذا وجد فراغ بينهما فيجب أن يملأ بالطين. وفى حالة وجود مجموعة بيزومترات فى موقع واحد فإنه من الضرورى وضع أرقام كودية لكل بيزومتر وتحديد عمقه، ويفضل إتباع طريقة متفق عليها بحيث تقطع النهايات العليا لأنابيب البيزومترات فتكون نهاية أعمق بيزومتر أوطى ما يمكن لسطح الأرض وهكذا.

ويلزم تغطية فوهات آبار الملاحظة والبيزومترات بإحكام لمنع دخول الشوائب إلى الأنابيب وحمايتها من العبث بها.

١٠-٢-٤ آبار التغذية أو آبار الشحن Recharge Wells
تستخدم آبار التغذية (الشحن) فى توصيل المياه من سطح الأرض إلى خزانات المياه الجوفية وتكون حركة المياه بها عكس اتجاه حركة المياه فى الآبار الإنتاجية ولكنها قد تكون مماثلة من الناحية الإنشائية أو مختلفة عنها تبعا للغرض من إنشائها. ومن الممكن استخدام البئر الإنتاجى كبئر شحن.

١٠-٢-٥ آبار التجمع القطرى Radial Collector Wells

وهى آبار إنتاجية تسمح بضخ كميات كبيرة من المياه عن طريق بئر واحد عندما يتعذر الحصول عليها اقتصاديا من بئر واحد عميق أو حتى من مجموعة آبار.

ويتكون بئر التجمع القطرى من بيارة ذات قطر كبير نسبيا (٢ - ٣ متر) تصل إلى الطبقة الحاملة للمياه وتخترقها بعمق كاف وعندها يتم دفع مواسير ذات ثقوب بطول مناسب (٦٠ - ٩٠ متر) أفقيا فى اتجاه قطرى خلال الطبقة الحاملة للمياه بحيث تسمح بتجميع المياه فى الاتجاه القطرى إلى داخل البيارة حيث يتم ضخها إلى سطح الأرض كما هو موضح فى الشكل (١٠-٥) ويراعى أن يكون منسوب الأنابيب (المواسير المثقبة) تحت مستوى سطح المياه الديناميكى (أثناء الضخ).

١٠-٣ معايير تصميم الآبار الإنتاجية

١٠-٣-١ عناصر التصميم

عند تصميم البئر الإنتاجى يجب تحديد العناصر التالية :

- مقاس Size الغلاف الزلطى وفتحة المصافى Slot .
- قطر المصافى.
- غلاف المضخة وقطر البئر.

وتعتمد هذه العناصر أساسا على تصرف البئر كما تعتمد على بعضها البعض إلى حد ما. ويجب أن يكون الهدف من تصميم البئر هو تجنب انخفاض كفاءته خلال العمر الافتراضى للبئر.

١٠-٣-١-١ مقاس الغلاف الزلطى وفتحة المصافى

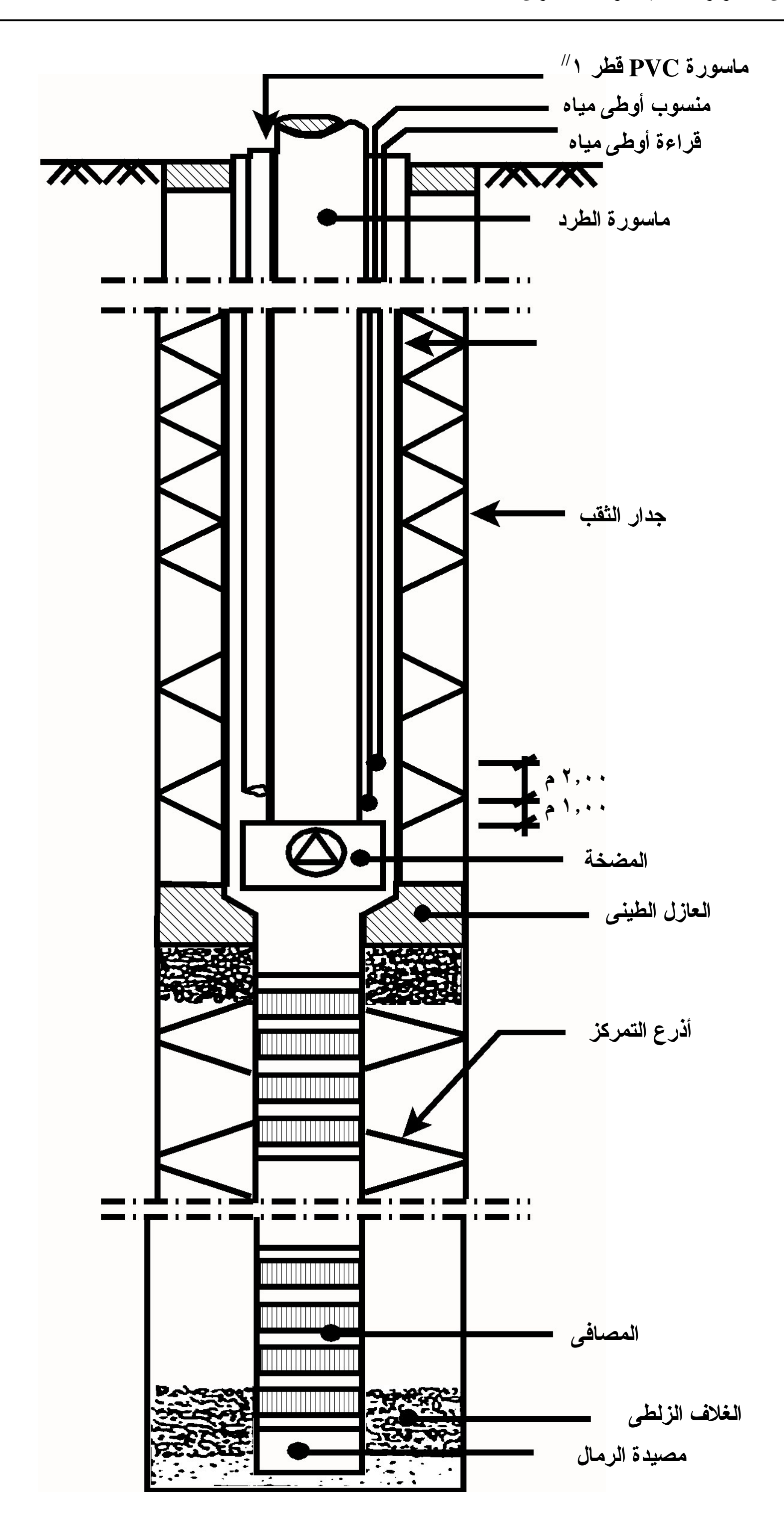
يعتمد مقاس فتحة مصافى البئر على التدرج الحبيبى للتكوين الحامل للمياه حول البئر ، ففى حالة الرمل الخشن جدا يكون المقاس الصحيح للفتحة Slot Size هو الذى يسمح بمرور ما بين ٣٠ % ، ٥٠ % من كل من المقاسين D_{30} ، D_{50} من حبيبات التكوين الحامل للمياه (بحيث لا يزيد عن ٥ مم). وتتم خلال عملية تطهير البئر إزالة الحبيبات الصغيرة ذات الأقطار الأقل من D_{30} إلى D_{50} من التكوين الحامل للمياه حول مصافى البئر وتبقى الحبيبات الخشنة فى الخلف مكونه غلافا زلطيا طبيعيا (Natural Gravel Pack) مثل الطبقات الحاملة للمياه ذات التدرج الحبيبى ج ،د ، هـ ، و فى الشكل (١٠-٦). أما فى حالة الرمال المتوسطة والناعمة كما فى الشكل (١٠-٦) فإن تطبيق هذه القاعدة لحساب مقاس فتحة المصافى سوف يعطى فتحة صغيرة جدا (أقل من ١ مم).

وتسبب الفتحات الضيقة جدا زيادة المقاومة لحركة المياه الجوفية إلى داخل البئر مما يؤدى إلى زيادة الفاقد فى الضاغط وبالتالى زيادة مقدار الهبوط Draw down . كما أنه قد يحدث انسداد للفتحات الصغيرة بواسطة حبيبات الطمى والرمال الدقيقة أو بترسيب بعض المواد مثل كربونات الكالسيوم أو بنمو بكتريا الحديد والمنجنيز وفى هذه الحالة يمكن استعمال فتحات أكبر باستخدام غلاف زلطى اصطناعى Artificial Gravel Pack ووضعه فى الفراغ البينى Annular Spaceبين مصفى البئر وجدران ثقب الحفرة. وتكون المعايير التى تربط مكونات الغلاف الزلطى ومقاس الفتحة والتدرج الحبيبى لمكونات الطبقة الحاملة للمياه كما يلى :

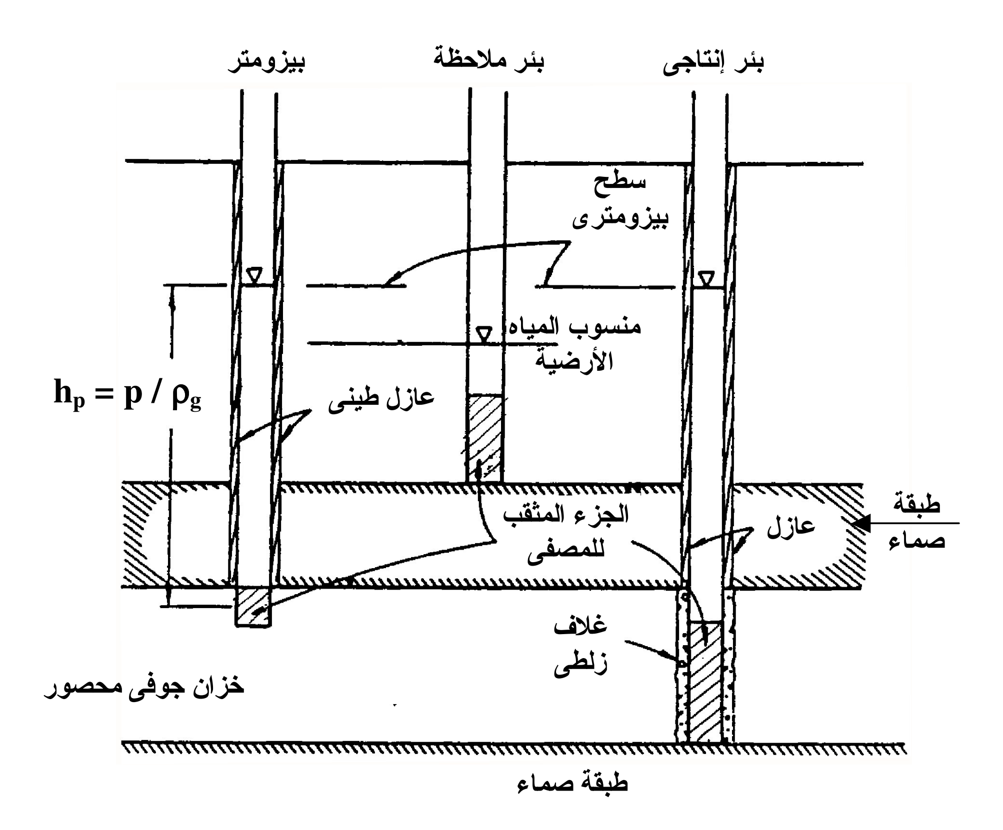
$$4\,D_{85}\text{ (Aquifer material)} > D_{15}\text{ (Gravel pack)} > 4\,D_{15}\text{ (Aquifer material)} \qquad (10\text{-}1)$$

$$D_{90} / D_{10}\text{ (Gravel pack)} < 2 \qquad (10\text{-}2)$$

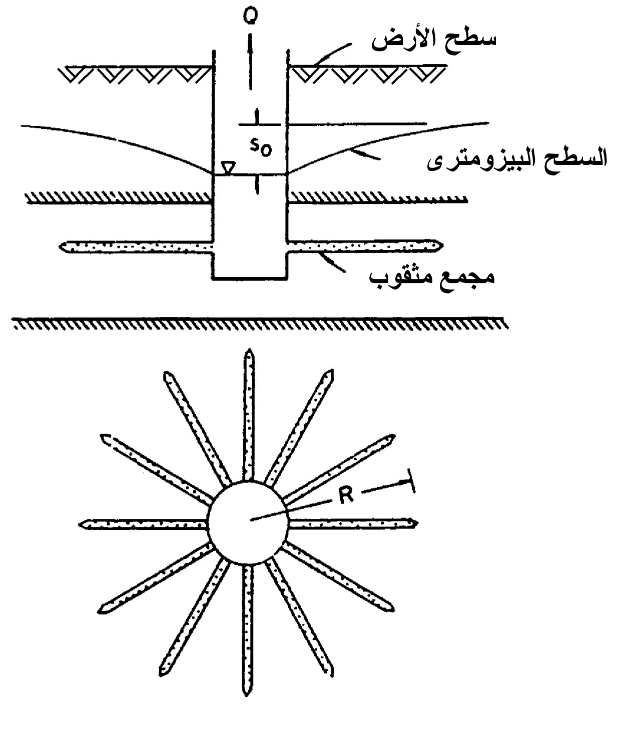
$$\text{Screen slot size} < (1/3)\text{ to }(1/2)\,D_{10}\text{ (Gravel pack)} \qquad (10\text{-}3)$$



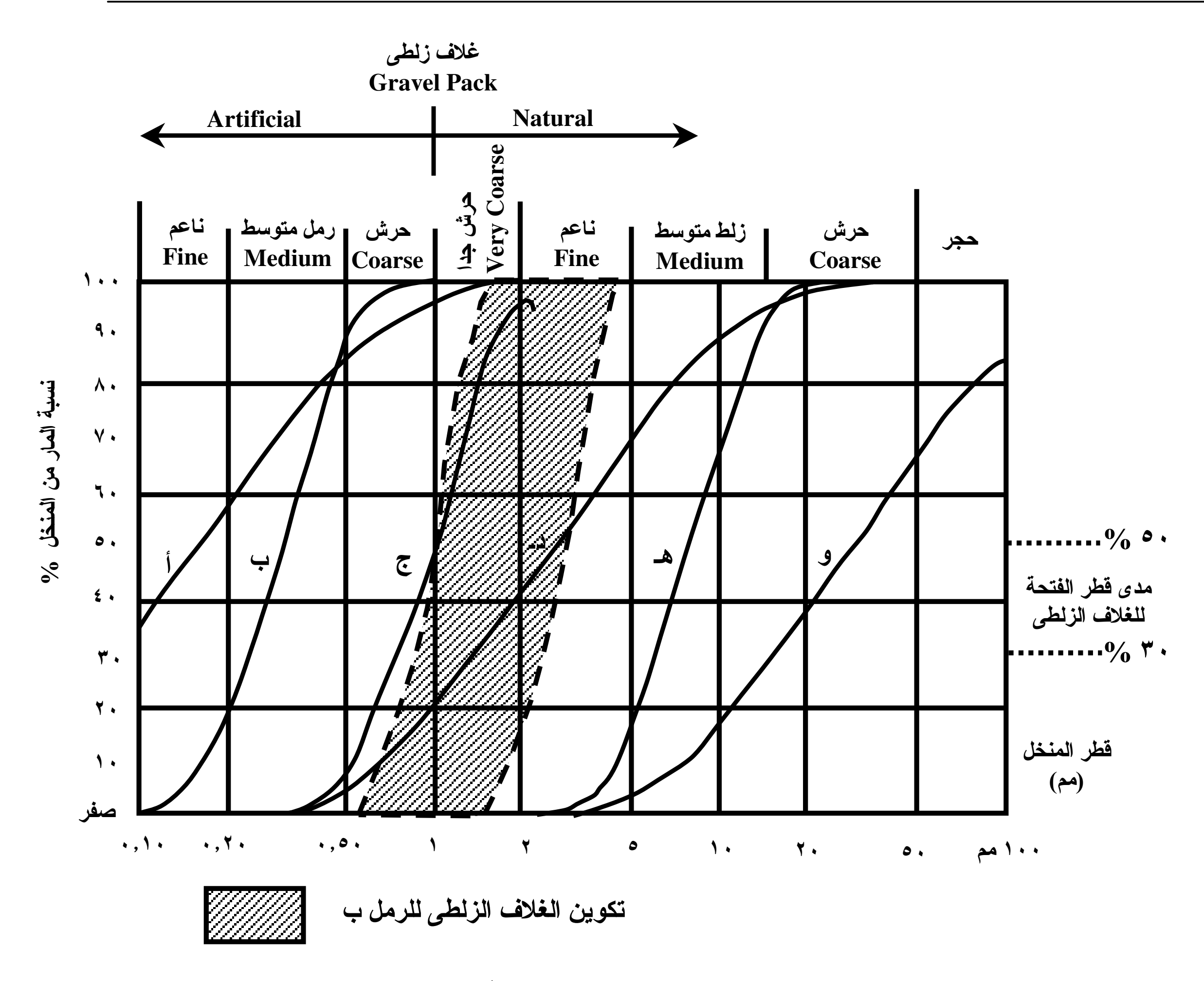
شكل (١٠-٣) المكونات الرئيسية للبئر الإنتاجى



شكل (١٠-٤) رسم تخطيطى يبين الفرق بين البئر الإنتاجى وبئر الملاحظة والبيزومتر



شكل (١٠-٥) بئر التجمع القطرى



شكل (١٠-٦) التدرج الحبيبى ومقاس فتحة المصافى

مثال لحساب الغلاف الزلطى

التكوين الطبيعى للطبقة الرملية الحاملة للمياه "ب" يحتاج إلى فتحة صغيرة جدا (أقل من ١ مم) حتى تسمح بمرور نسبة من ٣٠ إلى ٥٠ % لذلك فإنه يلزم استخدام غلاف زلطى اصطناعى وتكون له المعايير التالية :

بالرجوع إلى خواص الطبقة الرملية "ب" فى الشكل (١٠-٦) وبتطبيق المعيار السابق (١٠-١) ينتج :

$$2 \text{ mm} > D_{15} \text{ (Gravel pack)} > 0.7 \text{ mm}$$

وكذلك ينتج من المعيار (١٠-٢)

$$D_{90} / D_{10} \text{ (Gravel pack)} < 2$$

وهذا يعطى تكوينات للغلاف الزلطى موازية للمنحنيين اللذين يحدان المساحة ذات التهشير بالشكل (١٠-٦). وفى هذه الحالة يتم إختيار الحد العلوى للغلاف الزلطى :

$$D_{10} = 2 \text{ mm}, D_{90} = 3 \text{ mm}$$

وهو ما يسمح باستخدام فتحة مقاس ١ مم (أى ١ / ٢ * ٢ مم).

ويلزم قبل اعتماد الزلط المستخدم بواسطة المهندس المشرف على التنفيذ التأكد من أن الزلط قد تم غسيله وإلا وجب رفضه.

١٠-٣-١-٢ قطر المصافى

يعتمد تصميم المصافى المرتبط بتصرف البئر على الاعتبارين التاليين :

- تقليل فواقد البئر Well Losses إلى الحد الأدنى حيث أن فواقد البئر الكبيرة تعنى الزيادة فى تكاليف الضخ.
- تسهيل عملية التشييد السليم للبئر.

وأهم الفواقد هى فواقد الحركة الصفائحية Laminar Losses فى المنطقة المدمرة Damaged Zone (وهى السطح المشترك بين الطبقة الحاملة للمياه وثقب الحفرة) وفواقد الحركة المضطربة Turbulent Losses فى الغلاف الزلطى والمصافى. ويمكن تقليل الفواقد الصفائحية بواسطة الإختيار المناسب لمكونات مائع الحفر (أنظر الفصل الرابع) بجانب التطهير الجيد للبئر بعد التشييد أما الفواقد المضطربة فمن الممكن تجنبها إذا كان القطر الحرج D_c أقل من قطر المصافى D_s . ويعرف القطر الحرج بأنه القطر الذى تتحول عنده حركة المياه من الحالة الصفائحية إلى الحالة المضطربة ، وفى هذه الحالة يمكن استعمال العلاقة التجريبية Empirical التالية:

$$D_c = 2.56\ (Q / L_s)\ x\ (D_{50} / n_e) < D_s \qquad (10\text{-}4)$$

حيث

D_c = القطر الحرج بالمليمتر

Q = تصرف البئر متر مكعب / ساعة

D_{50} = القطر الذى يسمح بمرور ٥٠ % من مكونات الغلاف الزلطى بالمليمتر Passing Diameter

L_s = طول المصافى بالمتر

D_s = قطر المصافى بالمليمتر

n_e = المسامية الفعالة effective porosity

ويمكن إهمال فواقد الدخول entrance خلال المصافى إذا كانت مساحة الفتحات تشكل من ١٠ إلى ١٥ % على الأقل من إجمالى المساحة السطحية للمصفاة علما بان زيادة مساحتها عن ذلك لا يؤدى إلى زيادة كفاءة البئر .

أما عن فواقد الاحتكاك داخل المصافى وغلاف البئر فإنها تصبح كبيرة إذا زادت سرعة المياه الصاعدة إلى أعلا Vu عن ١ - ١,٢ م / ث ويمكن عندئذ استنتاج قطر المصافى من العلاقة التالية المستخلصة من معادلة الاستمرارية Continuity Equation

$$D_s > \frac{\sqrt{354\,Q}}{V_u} \qquad (10\text{-}5)$$

بحيث تكون الوحدات كما يلى D_s بالمليمتر ، Vu م / ث ، Q متر مكعب / ساعة ، ويجب مراعاة أن يكون الفراغ البينى المحصور بين مواسير المصافى وغلاف المضخة من جهة وبين جدران ثقب الحفرة من ٧٥ إلى ١٠٠ مم على الأقل حتى تسهل عملية تثبيت الغلاف الزلطى فى موضعه بصورة جيدة.

١٠-٣-١-٣ غلاف المضخة Pumping Casing وقطر البئر

يحكم مقاس المضخة الغاطسة تحديد قطر الجزء العلوى من غلاف البئر (غلاف المضخة) (شكل ١٠-٣) ويجب أن يزيد القطر الداخلى لغلاف المضخة حوالى ٥ سم عن قطر المضخة وذلك لأسباب التبريد. وعلى وجه العموم فإن هذا الحد الأدنى للقطر يزيد عن القطر اللازم للمصافى وبالتالى فهو يحدد قطر البئر D_w ، كما يعتمد طول غلاف المضخة على مقدار الهبوط Drawdown ومنسوب الماء الأستاتيكى والضاغط المطلوب.

١٠-٣-٢ هيدروليكا الآبار

١٠-٣-٢-١ قانون دارسى Darcy's Law

يحدد قانون دارسى التصرف خلال تربة مسامية ويكون كالآتى :

$$Q = KiA \text{ or } Q / A = V = Ki \qquad (10\text{-}6)$$

حيث

Q = مقدار التصرف المار (متر مكعب / يوم)

K = معامل النفاذية (م / يوم) Coefficient of Permeability

i = الانحدار الهيدروليكى - أى الفاقد فى الضاغط "h" فى مسافة قدرها L. Hydraulic Gradient

V = سرعة السريان (م / يوم)

والمعامل K فى معادلة دارسى يمثل ثابتا يتوقف على خصائص كل من الطبقة المسامية والسائل الذى يمر فيها والذى يمثله فى أغلب الأحيان الماء ويسمى معامل النفاذية أو معامل التوصيل الهيدروليكى Hydraulic Conductivity .

والجدول رقم (١٠-١) يمثل بعض القيم لمعامل النفاذية K لأنواع مختلفة من التربة. ويمثل الضاغط البيزومترى Piezometric Head ارتفاع سطح المياه فى البيزومتر منسوبا إلى سطح مقارنة والذى غالبا ما يكون المنسوب المتوسط لسطح البحر (منسوب الصفر) وهذا الارتفاع يعرف بالمتر والسطح البيزومترى هو السطح التخيلى المار بكل النقاط التى يرتفع إليها سطح المياه فى البيزومترات التى تخترق الطبقة الحاملة للمياه.

جدول (١٠-١) القيم التقريبية لمعامل النفاذية K للأنواع المختلفة من التربة (عن الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات ١٩٩٥)

معامل النفاذية م / ث

١ — 10^{-1} — 10^{-2} — 10^{-3} — 10^{-4} — 10^{-5} — 10^{-6} — 10^{-7} — 10^{-8} — 10^{-9} — 10^{-10}

الصرف	جيد		ضعيف	عمليا غير منفذ
نوع التربة	زلط نظيف	رمال نظيفة وخليط من الرمل والزلط	رمال ناعمة جدا وطمى ورقائق طين وطمى	طين غير مشقق وطمى مخلوطين جيدا يحتويان على أكثر من ٢٠ % طين
		طين مشقق مجفف		
الطرق المقترحة لتعيين معامل النفاذية	إختبارات الضخ فى الموقع			سريان من قمة البيزومتر
	إختبارات جهاز النفاذية ذو الضغط الثابت		متزنة	غير متزنة
	التقدير من منحنيات التدرج			
		جهاز النفاذية ذو الضغط المتناقص		محسوبة من الأديدوميتر أو إختبارات الضغط ذو الثلاثة محاور
		يعتمد عليه جدا	يعتمد عليه	

والسطح الحر Water Table هو سطح المياه الحر داخل الطبقة الحاملة للمياه ويكون عنده الضغط مساويا للضغط الجوى ويمثل الارتفاع الذى يصل إليه الماء الأرضى فى آبار الملاحظة.

١٠-٣-٢-٢ تعريف أنواع الطبقات الحاملة للمياه Aquifers

أ- الطبقات غير المحصورة Unconfined or Phreatic Aquifers

الطبقة الحاملة للمياه وغير المحصورة المبينة فى شكل (١٠-٧-أ) هى طبقة مسامية تحتوى على المياه بطريقة غير تامة ويوجد طبقة كتيمة نسبيا تحدها من أسفل ويجب أن يظهر بها سطح الماء الحر الذى يكون معرضا للضغط الجوى وفى حالة وجود بئر يخترق مثل هذه الطبقة فإن منسوب سطح المياه داخل البئر يمثل منسوب سطح المياه الحر فى الطبقة أما فى حالة وجود سريان فى الاتجاه الرأسى فيكون المنسوب مختلفا. والماء فى هذه الحالة يسمى ماء غير محصور أو مياه حرة. وفى حالة الطبقات الحاملة للمياه غير المحصورة والمكونة من تربة ذات حبيبات دقيقة فإن بدء صرف المياه من فراغات هذه التربة لا يحدث لحظيا ولكن يحدث بعد مرور فترة من بدء تخفيض منسوب المياه. وتسمى الطبقات التى تحدث بها هذه الظاهرة بالطبقات غير المحصورة ذات السحب المتأخر Delayed Yield .

ب- الطبقات المحصورة Confined Aquifers

الطبقة الحاملة للمياه والمحصورة المبينة فى الشكل (١٠-٧-د) هى الطبقة الواقعة بأكملها تحت سطح المياه ويحدها من أعلى وأسفل طبقة كتيمة ويلاحظ أنه لا يوجد فى الطبيعة ما يسمى بالطبقة الكتيمة وبذلك تكون مثل هذه الحالة غير متوافرة ومن الصعب تعريفها. ولكن يمكن تحديد مثل هذا النوع من الطبقات حيث يزيد ضغط المياه بها كثيرا على سطح الطبقة العلوي. وهذا يحدده قياس منسوب المياه الجوفية داخل ماسورة بيزومتر أو بئر يخترق هذه الطبقة حيث سيرتفع منسوب المياه داخل البيزومتر فوق منسوب السطح العلوى لهذه الطبقة. ويسمى الماء فى الطبقات المحصورة بالماء الارتوازى Artesian.

ج- الطبقات شبه المحصورة Semi-Confined Aquifers (Leaky Aquifers)

الطبقة شبة المحصورة أو الطبقة المسربة (شكل ١٠-٧-ج) هى الطبقة المحصورة تماما والتى يحدها من أعلى طبقة شبه منفذة ومن أسفل طبقة غير منفذة (كتيمة). والطبقة شبة المنفذة هى تلك الطبقة التى لها قيمة منخفضة لمعامل النفاذية K بالمقارنة بالطبقة المجاورة لها.

ويؤدى تخفيض الماء الأرضى فى الطبقة الحاملة للمياه وشبة المحصورة عن طريق سحب المياه منها بالآبار إلى سريان رأسى من الطبقة شبة المنفذة إلى الطبقة التى تم سحب المياه منها.

د- الطبقات شبه غير المحصورة Semi-Unconfined Aquifers

فى حالة زيادة معامل النفاذية للطبقة ذات الحبيبات الدقيقة والحاملة للمياه فإن مركبة السريان تكون كبيرة فى الاتجاه الأفقى للطبقة العليا التى تغطى الطبقة الحاملة للمياه ولذا لا يمكن إهمالها وعلى ذلك تكون هذه الحالة متوسطة بين الطبقة التقليدية شبة المحصورة والطبقة غير المحصورة وبذلك يمكن أن تسمى الطبقة شبة غير المحصورة (شكل ١٠-٧-ب)

ويبين شكل رقم (١٠-٨) منحنيات الهبوط فى سطح الماء مع الزمن Time Drawdown نتيجة الضخ من مختلف أنواع الطبقات الحاملة للمياه السابق ذكرها.

١٠-٣-٢-٣ الخصائص الهيدروليكية للطبقات

أ- معامل التوصيل Transmissivity or Transmissibility

وهو يمثل حاصل ضرب معامل النفاذية K فى سمك الطبقة الحاملة للمياه D ويرمز لها بالرمز KD أو T ووحداتها هى متر مربع / يوم.

ب- معامل التخزين ومعامل السحب النوعى

Storage Coefficient and Specific Yield

يمكن تعريف معامل التخزين S ومعامل السحب النوعى SY بأنهما كميتا المياه التى يمكن سحبها أو تخزينها من وحدة المساحات من الطبقة الحاملة للمياه عند تغير يساوى الوحدة فى الضاغط الكلى وهو فى حالات الطبقات المحصورة الحاملة للمياه يعتمد على مرونة مواد الطبقة الحاملة للمياه وله قيم تتراوح بين ٤- و ٦- أما فى حالة الطبقات غير المحصورة فإن معامل التخزين يساوى عمليا معامل السحب النوعى Specific Yield وتصل قيمته إلى ٠,١ - ٠,٢ فى حالة الرمال.

ج- المقاومة الهيدروليكية Hydraulic Resistance

وهى المقاومة للسريان الرأسى خلال الطبقة شبة المنفذة فى حالة الطبقات الحاملة للمياه شبه المحصورة ويرمز له بالرمز $C=\frac{D'}{K'}$ حيث D' هو سمك الجزء المشبع بالمياه فى الطبقة شبه المسامية ، K' معامل النفاذية فى الاتجاه الرأسى للطبقة شبة المنفذة. والوحدات المميزة له هى وحدة الزمن (عادة اليوم).

د- معامل التهريب Leakage Factor

ويرمز له بالرمز $L=\sqrt{KDC}$ وله وحدات الطول (متر) ويحدد توزيع التهريب إلى الطبقة شبه المحصورة والقيمة العالية له تمثل مقاومة عالية للسريان من الطبقة شبه المسامية مقارنة بالمقاومة فى الطبقة الحاملة للمياه ذاتها.

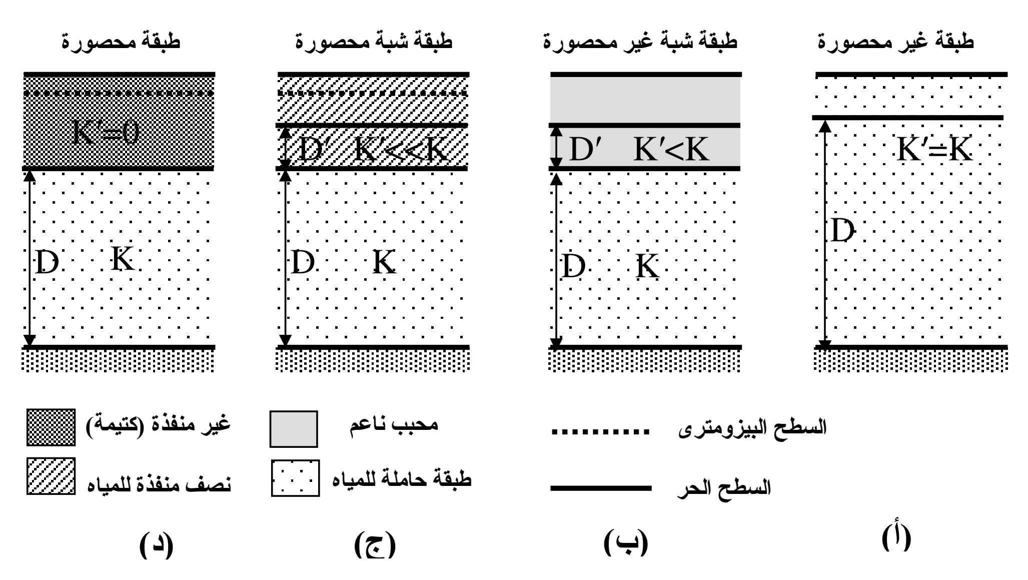
هـ- معامل الصرف Drainage Factor

ويرمز له بالرمز B حيث :

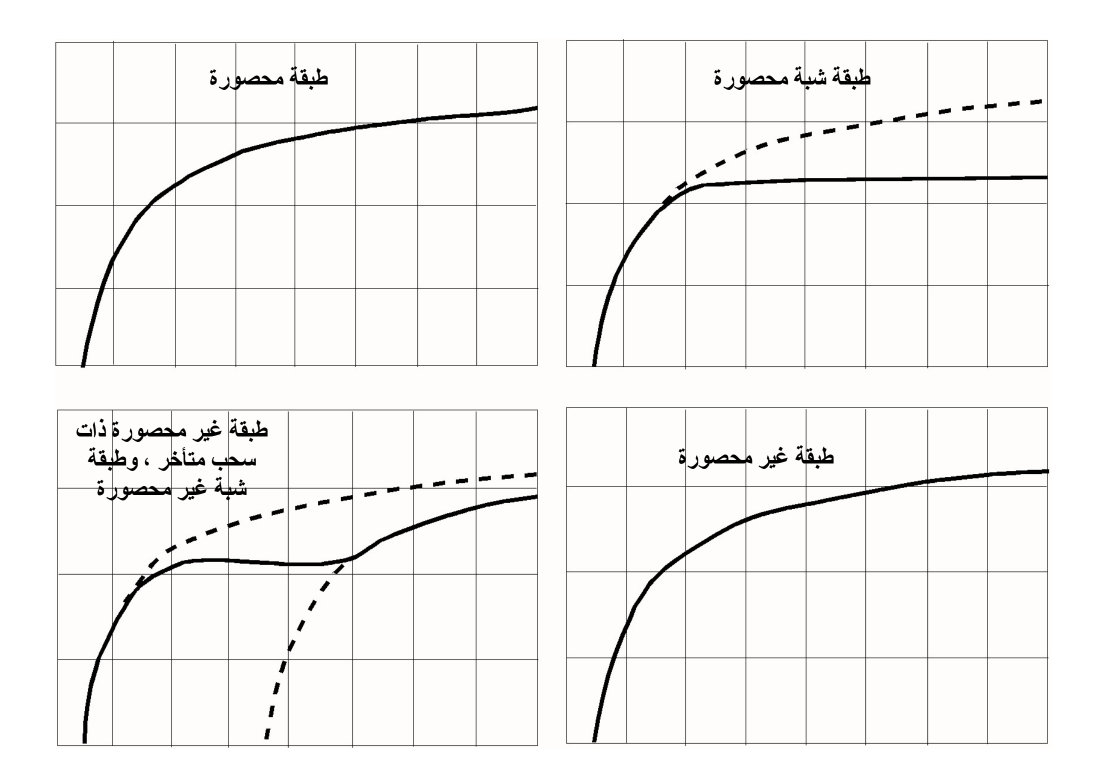
$$B=\sqrt{\frac{DK}{\alpha S_y}} \tag{10-7}$$

حيث يسمى $\frac{1}{\alpha}$ معامل بولتون Boulton Delay Index وهو يستخدم فى حالة الطبقات الحاملة للمياه غير المحصورة التى يحدث بها حالة السحب المتأخر Delayed Yield ، والذى يمكن مقارنته بمعامل التهريب فى حالة الطبقات شبة المحصورة ، وله أيضا وحدات أطوال (متر مثلا).

وإذا كانت قيمة B عالية جدا فإن هذا يعنى أن السحب يكون لحظيا مع تخفيض منسوب سطح المياه الجوفية الحر ، وفى هذه الحالة تكون الطبقة الحاملة للمياه غير محصورة بدون تأخر فى السحب.



شكل (١٠-٧) العلاقة بين K' , K لمختلف أنواع الطبقات الحاملة للمياه



شكل (١٠-٨) نماذج لمنحنيات الهبوط فى سطح الماء مع الزمن لمختلف أنواع الطبقات الحاملة للمياه

١٠-٣-٢-٤ أنواع السريان

هناك نوعان من السريان هما السريان المستقر والسريان غير المستقر.

أ- السريان المستقر Steady Flow

السريان المستقر هو الذى يحدث فى حالة ما يكون السحب من البئر مساويا لكمية المياه الواصلة للطبقة الحاملة للمياه. وتمثل هذه الحالة فى المراجع المختصة جزيرة دائرية الشكل وتحيطها المياه من كل جانب ومنسوب المياه بها ثابت مع الزمن.

ب- السريان غير المستقر Unsteady Flow

السريان غير المستقر هو الذى يحدث من لحظة بدء السحب من البئر حتى الوصول إلى حالة السريان المستقر وفيه يتغير منسوب المياه مع الزمن نتيجة السحب.

١٠-٣-٢-٥ علاقة تصرف البئر ومقدار الهبوط فى سطح المياه

يصاحب ضخ المياه من البئر حدوث هبوط فى منسوب سطح المياه فى الطبقة الحاملة للمياه وداخل البئر. ويتعرض الحساب الهيدروليكى للبئر إلى تحديد مقدار هذا الهبوط وسرعة سريان المياه الجوفية وعلاقتها بمقاسات عناصر البئر (عرض فتحة المصافى ، طول المصافى ، قطر المصافى ، قطر ثقب الحفرة (Bore Hole) وتنتهى خطوات الحساب الهيدروليكى بإختيار تصرف البئر ، والذى يحدد مقاسات عناصر البئر السابق ذكرها.

ويتوقف أقصى تصرف يمكن ضخة من البئر على مقدار هبوط منسوب سطح المياه داخل البئر المصاحب للضخ ، ويكون أقصى عمق للسحب هو حوالى ٦ متر تحت سطح الأرض عند استخدام مضخة شفط فوق السطح ، أما فى حالة استعمال مضخات الآبار فإن السحب يعتمد على موضع المضخة والتى يجب أن تكون دائما غاطسة تحت سطح الماء.

ويكون أقصى تصرف مسموح بضخه من البئر أقل من أقصى تصرف تصميمى، وذلك لضمان عدم انسداد المصافى والغلاف الزلطى. وهو دالة من سرعة سريان المياه عند تقاربها من البئر.

وتعطى المعادلات التالية مقدار الهبوط فى سطح المياه الجوفية نتيجة السريان القطرى فى حالة الاستقرار Steady.

أ- الاختراق الكلى للبئر Full Penetration

حالة الطبقة الحاملة للمياه المحصورة : معادلة تيم Thiem

$$S = h_2 - h_1 = \frac{Q_w}{2\pi KD} \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad (10\text{-}8)$$

حالة الطبقة الحاملة للمياه شبة المحصورة : معادلة حنتوش Huntush

$$S = h_2 - h_1 = \frac{2.3\, Q_w}{2\pi KD} \operatorname{Log} \left(\frac{1.12\, L}{R}\right) \qquad (10\text{-}9)$$

حالة الطبقة الحاملة للمياه غير المحصورة : معادلة تيم - ديبوى Thiem – Dupuit

$$Q = \pi K \frac{h_2^{\,2} - h_1^{\,2}}{\ln (r_2 / r_1)} \qquad (10\text{-}10)$$

وهذه المعادلة (١٠-١٠) لا تعطى وصفا دقيقا لمنحنى هبوط سطح الماء بالقرب من البئر نظرا لأن الانحناء الشديد فى سطح المياه الحر لا يتفق مع افتراضات ديبوى Dupuit وبالتالى فقد تم إهمال تأثير كل من منطقة التسرب فوق سطح الماء فى البئر وحركة المياه الجوفية فى منطقة الخاصة الشعرية والمركبة الرأسية للسرعة والتى تبلغ أقصى مداها قرب البئر. ولذلك فإنه يمكن تحويل هذه المعادلة إلى نفس معادلة حالة الطبقة المحصورة بحيث يصبح مقدار الهبوط مساويا للهبوط المصحح.

وفى المعادلات السابقة يكون:

Q_w = تصرف البئر - متر مكعب / يوم

KD = معامل النقل Transmissivity للطبقة الحاملة للمياه - متر مربع / يوم

r_1, r_2 = البعدان عن بئر الضخ للبيزومترين المتتاليين - متر

h_1 ، h_2 = ارتفاع سطح الماء فى البيزومترين على التوالى - متر

L = معامل التهريب - Leakage Factor - متر

R = البعد من البئر المطلوب حساب الهبوط عنده

D= سمك الطبقة الحاملة للمياه

S= الهبوط فى سطح المياه الجوفية = (h_2-h_1)

ب- الاختراق الجزئى للبئر Partial Penetration

ليس من الممكن دائما وضع مصافى البئر بكامل سمك الطبقة الحاملة للمياه وفى هذه الحالة يكون اختراق البئر جزئيا وتصبح خطوط السريان Flow lines غير أفقية فى الطبقة الحاملة للمياه حول البئر بمسافة 2D>r (حيث D سمك الطبقة) ولكنها تكون قطرية منحنية رأسيا (شكل رقم (١٠-٩)) . وعمليا فإن المساحة التى يتأثر بها الهبوط نتيجة المركبة الرأسية للسريان تنحصر فى نصف القطر D = r تقريبا حيث أنه غالبا ما يهمل هذا التأثير فى حالة D < r < 2D ويمكن التغلب على تأثير الاختراق الجزئى للآبار للسريان المستقر بتطبيق إحدى طرق التصحيح Correction Methods للبيانات التى تم جمعها فى المنطقة المتأثرة ، مثل طريقة هويسمان Huisman التالية:

$$S_p = \frac{Q_w}{2\pi KD}\left(\frac{1-P}{P}\right)\ln\left(\frac{(1-P)\,L_s}{R_w}\right) \qquad (10\text{-}11)$$

حيث

S_p = الهبوط الزائد نتيجة الاختراق الجزئى - متر

$L_s / D = P$ = نسبة الاختراق

K = معامل النفاذية - م / يوم

R_w = نصف قطر البئر

R_w, L_s, D - بالمتر (شكل رقم ١٠-١٠)

ويوضح الشكل (١٠-١٠) تعريف الرموز المستخدمة فى المعادلة (١٠-١١)

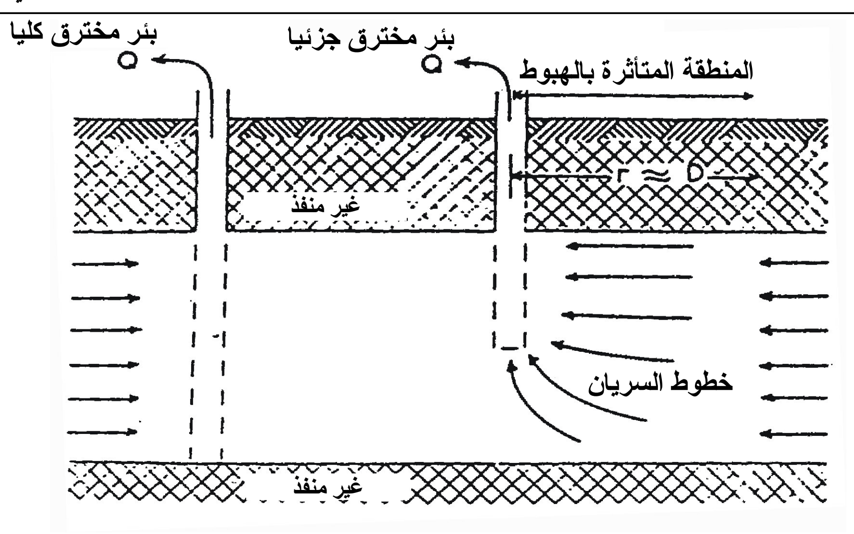
١٠-٣-٢-٦ سريان المياه الجوفية داخل البئر

يقاس الهبوط الكلى لضاغط المياه بدءا من منسوب المياه الأستاتيكى قبل الضخ ووصولا إلى منسوب المياه داخل البئر أثناء الضخ ويتكون هذا الهبوط من جزئين :

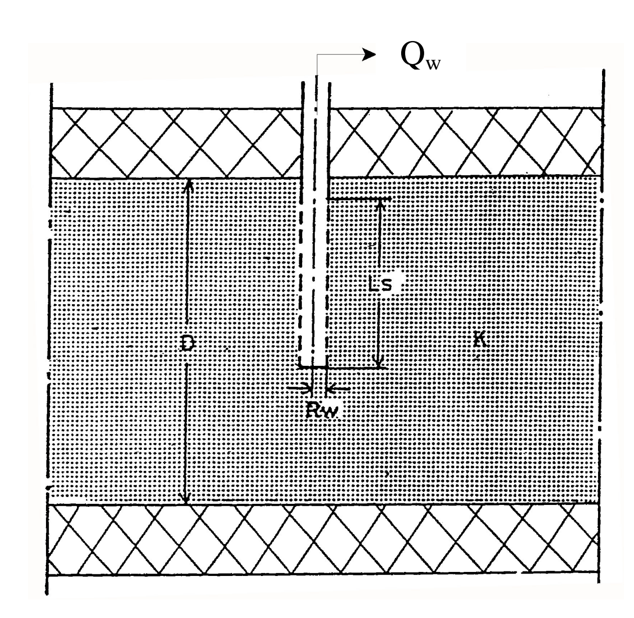
الأول : الفاقد نتيجة السريان خلال الطبقة الحاملة للمياه Aquifer Loss .

الثانى : فواقد البئر Well Losses نتيجة سريان المياه خلال الأجزاء المتتالية للبئر شكل (١٠-١١).

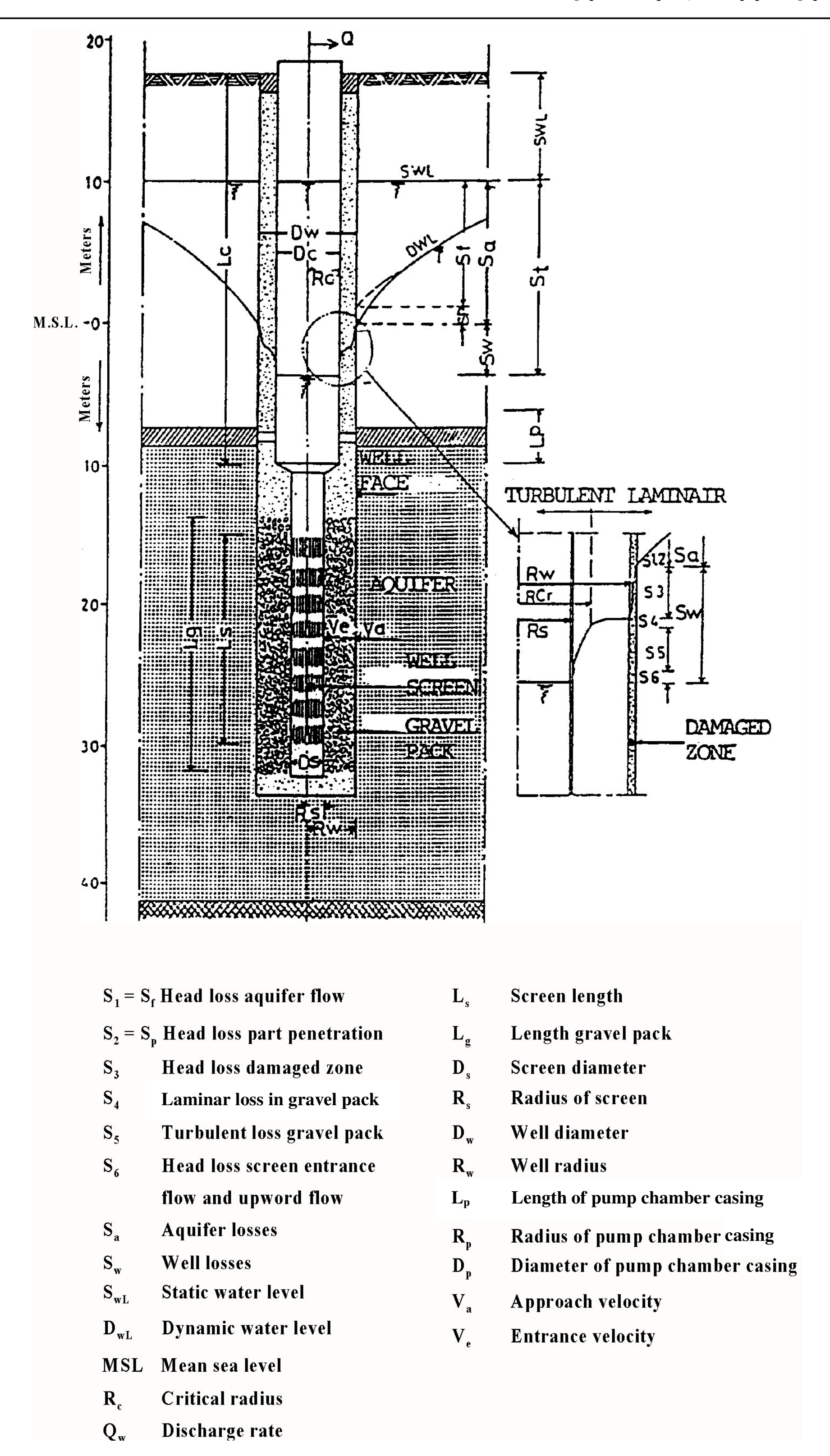
وعند انتقال السريان من الطبقة الحاملة إلى داخل البئر فإنه تحدث فواقد فى الضاغط نتيجة السريان الصفائحى Laminar خلال المنطقة المدمرة Damaged Zone والغلاف الزلطى وكذلك نتيجة السريان المضطرب Turbulent خلال الجزء التالى من الغلاف الزلطى وفتحات المصافى وداخل المصافى.



شكل (١٠-٩) الاختراق الجزئى والاختراق الكامل للآبار



شكل (١٠-١٠) الهبوط نتيجة الاختراق الجزئى للبئر



شكل (١٠-١١) عناصر الهبوط داخل البئر

والمنطقة المدمرة عبارة عن الجبهة بين الطبقة الحاملة للمياه وبين حفرة البئر Borehole وهى عادة تتكون من أجزاء ناتجة عن الحفر ، وبقايا سائل الحفر أو مواد أخرى تكون ذات معامل نفاذية أقل من الطبقة الحاملة مما يسبب فاقدا فى الضاغط مقداره S_3 كما هو مبين فى الشكل (١٠-١١) وتزيد سرعة السريان خلال الغلاف الزلطى مع الاتجاه إلى محور البئر ، وقد يصبح السريان مضطربا إذا تم الوصول إلى نصف القطر الحرج Critical Radius R_C . ويكون الفاقد فى الضاغط فى حالة السريان المضطرب أعلا بكثير منه فى حالة السريان الصفائحى.

ويعرف R_c كما يلى :

$$R_c = 1.28 \frac{Q_w}{L_s} \frac{D_{50}}{n_e} \quad (10\text{-}12)$$

حيث

R_c = نصف القطر الحرج - مم

Q_w = تصرف البئر - متر مكعب / ساعة

D_{50} = القطر الذى يمر منه ٥٠ % من مادة الغلاف الزلطى - مم

L_s = طول المصافى - متر

n_e = المسامية المؤثرة Effective Porosity

والشكل (١٠-١١) يوضح فاقد الضاغط الصفائحى S_4 والمضطرب S_5

ومن الضرورى الآخذ فى الاعتبار سرعة السريان عند الدخول من فتحات مصافى البئر ، وهذه السرعة تساوى حاصل قسمة تصرف البئر على إجمالى مساحة فتحات المصافى ويجب ألا تزيد عن ٠,٠٣ م /ث.

١٠-٣-٢-٧ الظروف الحدودية Boundary Conditions

أحيانا يكون بئر السحب محفورا فى طبقة حاملة للمياه فى موقع مجاور لأحد الحدود ، وهذا الحد قد يكون فى صورة طبقة صخرية قاطعة للطبقة الحاملة للمياه أو مجرى مائى قاطع لهذه الطبقة. وفى مثل هذه الحالات لا يتحقق شرط استمرارية امتداد الطبقة الحاملة للمياه فى جميع الاتجاهات حتى يمكن تطبيق المعادلات السابق ذكرها.

لذلك يجب التفرقة بين نوعى الحدود التى تحد الطبقة الحاملة للمياه من النوعين الآتيين :

- حد كتيم (أى وجود طبقة صماء على مسافة محدودة من البئر) Barrier Boundary .
- حد مغذى بالمياه (أى وجود للمياه فى صورة مجرى مائى على مسافة محدودة من البئر) Recharging Boundary .

ويكون لمثل هذه الظروف الحدودية تأثير مباشر على مقدار الهبوط فى البئر إذا كان قريبا من تلك الحدود. ويمكن كتابة معادلة الهبوط فى حالة الطبقات الحاملة المحصورة وغير المحصورة كما يلى :

$$S = \frac{Q_w}{2\pi KD} \ln \frac{R_o}{R_w} \quad (10\text{-}13)$$

حيث R_o = مقدار ثابت بالمتر يعتمد على الظروف الحدودية والتى يمثلها الشكل (١٠-١٢).
(قطر دائرة التأثير الافتراضيه)

L= بعد مصدر التغذية عن محور البئر

١٠-٣-٢-٨ تخطيط حقل الآبار

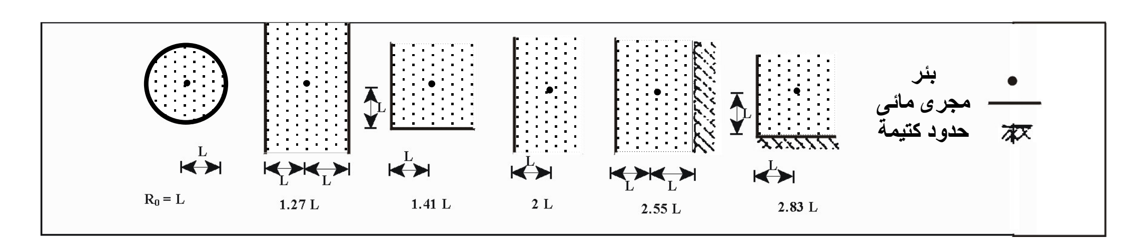
عندما يراد ضخ كمية محدودة من المياه فى منطقة ما بواسطة حقل آبار يحتوى على عدد معين من الآبار فإنه كلما قل عدد الآبار فإن تصرف البئر الواحد يزداد ويصاحبه هبوط أكبر وتكلفة عالية للطاقة وتكلفة تشغيل وصيانة أقل نسبيا بينما إذا زاد عدد الآبار فإن تصرف البئر الواحد يقل ويصاحبه هبوط أقل وتكلفة أقل للطاقة بينما تزداد نسبيا تكلفة التشغيل والصيانة ، وعلى ذلك فإن عدد الآبار الأمثل فى هذه الحالة هو الذى يعطى أقل تكلفة إجمالية كما هو مبين بالشكل (١٠-١٣).

ويصبح الهبوط فى منسوب المياه الجوفية قرب أى بئر فى حقل آبار متأثرا بالعوامل التالية :

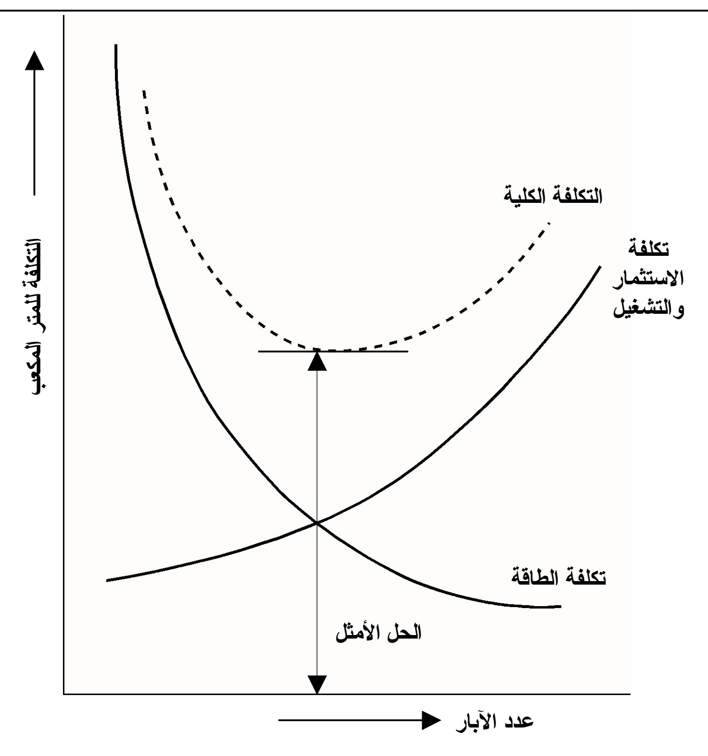
- منسوب المياه الجوفية الإقليمى Regional والذى يمكن رصده بواسطة آبار ملاحظة خارج حدود حقل الآبار.
- الهبوط فى منسوب المياه الجوفية نتيجة الضخ من الآبار الأخرى فى نفس حقل الآبار.
- الهبوط المحلى فى منسوب المياه الجوفية نتيجة السريان القطرى إلى البئر وكذلك نتيجة الاختراق الجزئى للبئر.

ويكون الهبوط الكلى هو ناتج جمع مقادير الهبوط المختلفة ويسمى منسوب المياه الجوفية فى المنطقة المجاورة للبئر "منسوب المياه الإستاتيكى"

ويفضل أن تكون المسافات بين الآبار متجانسة وليس بينها اختلافات كبيرة. وعندما تزيد قيمة معامل النقل Transmissivity عن ١٠٠٠ متر مربع / يوم فإن الفرق فى الهبوط عند واجهة كل بئر Well Face يختلف اختلافا طفيفا إذا ما كانت المسافة بين الآبار أكبر من ٥٠٠ متر.



شكل (١٠-١٢) الظروف الحدودية



شكل (١٠-١٣) عدد الآبار الأمثل فى حقل الآبار

١٠-٤ حفر الآبار واشتراطات التنفيذ

١٠-٤-١ مقدمة

يوجد هناك عدد من الطرق المختلفة المستخدمة فى حفر الآبار ، غير أن إختيار طريقة الحفر تعتمد أساسا على نوع التكوينات الجيولوجية لموقع الحفر وعمق البئر وقطره ومعدل الاختراق. ولا توجد طريقة حفر مثلى صالحة لكل الظروف الجيولوجية وإنشاءات الآبار ، وفى كثير من الحالات قد يكون مقاول الحفر هو الأكثر تأهلا لإختيار خطوات حفر محددة تتلاءم مع معطيات عناصر التشييد. وعملية الحفر الناجحة هى مزيج من القدرة المكتسبة من الخبرة الطويلة وتطبيق الوسائل الهندسية الجيدة.

ويشتمل تشييد البئر عادة على خمس عمليات هى :

- حفر.
- تركيب الـ Casing .
- تثبيت المصافى ووضع الغلاف الزلطى عند اللزوم.
- حقن Grouting للحماية من التلوث.
- تطهير البئر لضمان ضخ مياه خالية من الرمال عند التصرفات القصوى.

ويجوز أن تتم عمليتان أو ثلاث من هذه العمليات فى آن واحد بناء على طريقة الحفر المستخدمة.

وفيما يلى عرض مختصر لطرق الحفر التى تطبق عادة فى مصر أما النظرة الشاملة لجميع طرق الحفر فهى مستوفاة فى المراجع العلمية والهندسية.

١٠-٤-٢ طرق الحفر

١٠-٤-٢-١ الحفر اليدوى

توجد حفارات يدوية ذات أشكال وأحجام مختلفة تعمل بواسطة شفرات قاطعة فى أسفلها تؤدى إلى ثقب الأرض أثناء الحركة الدائرية. وعندما تمتلئ الشفرات بالتربة يتم رفع الحفارة من الثقب وتفريغها وتكرر هذه العملية حتى الوصول إلى العمق المطلوب. والحفارات اليدوية تعمل بكفاءة عالية فى حالة التكوينات الطينية الثقيلة وهى تستعمل بكثرة لتشييد آبار الملاحظة الضحلة.

١٠-٤-٢-٢ الحفر بآلة الكابل (الحفر بالدق) Cable Tool Percussion Drilling

تعمل هذه الحفارات الميكانيكية عن طريق رفع رأس ثقيل Bit بواسطة كابل لمسافة معينة ثم تركه ليسقط محدثا دقا تثاقليا داخل الثقب Bore hole وفى حالة حفر الصخور المندمجة Consolidated فإن هذه الرأس تعمل على تكسيرها إلى جزيئات بينما فى حالة حفر التكوينات غير المندمجة Unconsolidated فإن الرأس تعمل على خلخلتها. ويشترط فى حالة الحفر فى التكوينات غير المتماسكة إنزال Casing أثناء عملية الحفر لمنع انهيار جوانب البئر وتتم إزالة ناتج الحفر بواسطة مضخة رمال أو Bailer . وتمتاز هذه الطريقة بإمكان الحصول على عينات دقيقة للتكوينات الجيولوجية لذلك يفضل استعمالها فى عمليات الحفر الاستطلاعية ، غير أن معدل الاختراق بطئ نسبيا.

١٠-٤-٢-٣ الحفر الهيدروليكى الدوار Hydraulic Rotary Drilling

يتم فى هذه الطريقة توصيل الرأس الحفارة Drill Bit بالطرف الأسفل لماسورة الحفر والتى تنقل الحركة الدوارة من Rig إلى الرأس ويتم ضخ سائل الحفر إلى أسفل خلال ماسورة الحفر حيث يخرج من فتحات الرأس ثم يتدفق السائل إلى أعلا فى الفراغ البينى Annular Space المحصور بين ماسورة الحفر وجدران البئر حاملا معه نواتج الحفر إلى حفرة أو حفرتين للترسيب فوق سطح الأرض Setting Pits حيث تترسب معظم المواد المحفورة والعالقة بسائل الحفر والذى يعاد إلى دورته مرة ثانية إلى أسفل بالبئر بواسطة مضخة الطين.

ومقارنة بطريقة الحفر بالدق Percussion فإن الحفر الدوار يسمح بالوصول إلى أعماق أكبر ومعدلات حفر أعلى خلال معظم التكوينات الجيولوجية كما أنه غالبا لا يحتاج إلى Casing أثناء الحفر إذ أن سائل الحفر يعمل على حفظ جوانب البئر من الانهيار أثناء الحفر. غير أنه من عيوب هذه الطريقة عدم تحديد أعماق الطبقات والتكوينات الجيولوجية بدقة لأن نواتج الحفر تختلط ببعضها البعض فى سائل الحفر أثناء إنتقالها إلى أعلى - ولكن طرق الجس الجيوفيزيائى للبئر على وجه العموم تقدم المعلومات الإضافية اللازمة لإعادة تحديد التتابع الطبقى بمنطقة الحفر.

١٠-٤-٢-٤ الحفر الهيدروليكى الدوار بالدورة العكسية Reverse Circulation

عند حفر الآبار ذات الأقطار الكبيرة (أكثر من ٦٠٠ مم) يصبح لسرعة تدفق سائل الحفر إلى أعلى فى الفراغ البينى المحصور بين ماسورة الحفر وجدران البئر حد أدنى يجب ألا تتعداه . وفى مثل هذه الحالات يتم استخدام ماكينات الحفر الدوار ذات الدورة العكسية لسائل الحفر حيث يعكس اتجاه سائل الحفر بالمقارنة بطريقة الحفر الدوار المباشر. وعلى ذلك فإن سائل الحفر المحمل بناتج الحفر يتحرك إلى أعلى من خلال ماسورة الحفر ويتدفق إلى حفرة الترسيب بواسطة مضخة. ويعود سائل الحفر مرة ثانية إلى ثقب البئر Bore hole عن طريق التدفق تحت تأثير الجاذبية الأرضية وبالتالى يتحرك إلى أسفل من خلال الفراغ البينى المحصور بين ماسورة الحفر وجدران البئر حتى قاع ثقب البئر حاملا معه ناتج الحفر ويدخل بها من خلال فتحات رأس الحفارة ثم إلى ماسورة الحفر إلى أعلى.

١٠-٤-٢-٥ الحفر بالدق الدوار Rotary Percussion

يعد الحفر بالدق الدوار أسرع طرق الحفر ويتم عن طريق رأس دوار مع دقاق يعمل بالضغط الهوائي Pneumatic Hammer والذى قد تصل عدد دقاته إلى ١٥ دقة فى الثانية عند قاع ثقب البئر أما سائل الحفر فيتم ضخه مباشرة فى ماسورة الحفر أو بطريقة الدورة العكسية ويمكن الوصول إلى معدل سرعة اختراق يبلغ ٠,٣ متر / دقيقة فى حالة حفر طبقات صخرية صلبة مع استعمال الهواء بدلا من سائل الحفر.

١٠-٤-٣ سوائل (موائع) الحفر

يلزم استعمال موائع الحفر فى حالات الحفر الهيدروليكى الدوار ، ويجب أن تؤدى هذه الموائع العمليات التالية :

١- نقل ناتج الحفر من قاع ثقب البئر إلى حفرة الترسيب فوق سطح الأرض.
٢- تثبيت وتدعيم جدران ثقب البئر ومنعها من الانهيار.
٣- تبريد وتنظيف الرأس الحفارة.
٤- السماح بانفصال ناتج الحفر فى حفرة الترسيب.
٥- القيام بعملية (تشحيم ، تليين) Lubricate الرأس الحفارة والدعائم ومضخة الطين وماسورة الحفر.

وتشتمل موائع الحفر على الأنواع التالية :

<u>أولا :</u> موائع تعتمد على الماء

١-ماء عذب.
٢-ماء به إضافات طينية.
٣-ماء به إضافات بوليمر Polymer .
٤-ماء به مزيج من إضافات طينية وبوليمر.

<u>ثانيا :</u> موائع تعتمد على الهواء

١- هواء جاف.
٢- رذاذ ضباب مائي.
٣- رغاوى.
٤- رغاوى جامدة بالبوليمر والبنتونايت.

ويتم فقد جزء من سائل الحفر خلال دورته أثناء عملية الحفر بسبب اختراق هذا السائل للتكوينات المحيطة بالحفرة. وإذا حدثت زيادة فجائية فى فواقد سائل الحفر خلال دورته فإن ذلك يشير إلى أن الحفر يخترق قطاعا ذا نفاذية عالية أو شقوقا وفجوات مما يساعد على هروب سائل الحفر.

١٠-٤-٤ الإشراف على التنفيذ

يعتبر الإشراف الفنى أثناء الحفر هاما للغاية لمنع تنفيذ أعمال غير مطابقة للمواصفات أو الاشتراطات الفنية. وتصحيح معظم الأخطاء التى تقع أثناء الحفر يتطلب تكاليف باهظة (مما قد يسبب إعادة الحفر فى موقع جديد) أو أنه يؤثر على جودته بعد تشطيبه وإذا تم الحفر بقطر أقل من المطلوب فإن ذلك يمكن تصحيحه بتوسيع الثقب المحفور فيما بعد. غير أن عملية توسيع الثقب فى طبقات غير مندمجة عادة ما يسبب مشاكل كثيرة فيما يخص اتزان جدران الثقب وكثيرا ما يحدث معها انهيار. وتقع المسئولية على المقاول لحل هذه المشكلة ، وإذا قرر علاج الثقب المحفور (بدلا من إعادة الحفر) فإن ذلك قد يؤدى فى النهاية إلى بئر ذو نوعية رديئة للأسباب التالية :

١- عملية التوسيع والتنظيف تستهلك بعض الوقت مما يسمح لسائل الحفر بالاختراق إلى مسافات أبعد خلال الطبقات الحاملة للمياه.
٢- قد تتطلب عملية الحفاظ على الطبقة الطينية المغلفة لجدران ثقب الحفر استعمال سائل حفر أثقل مما يزيد من صعوبة إزالته خلال عملية تطهير البئر.

لذلك فإن الإشراف الوقائى على التنفيذ يستدعى ما يلى :

١٠-٤-٤-١ التحقق والتدقيق والتنظيم لأعمال الحفر

أ- تنظيم العمل

تستدعى أعمال حفر البئر وتشطيبه والأعمال الأخرى المرتبطة به وجود مقاول واحد أو أكثر كما يستلزم وجود مهندس يشرف على التنفيذ ممثلا للمالك.

ب- مسئوليات المقاول

تشتمل الأعمال التى يقوم بها المقاول عادة على ما يلى :

- إعداد الموقع وتجهيز المعدات.
- أعمال الحفر.
- إجراء عملية الجس الجيوفيزيائى لثقب الحفرة.
- إتمام البئر.
- تنظيف البئر.
- تطهير البئر.
- تجربة البئر.
- تشطيب رأس البئر وغرفة المضخة.
- تركيب المضخة والتركيبات الكهربائية وأعمال المواسير.
- تجربة جميع التركيبات.
- تنظيف الموقع وإزالة المعدات.

ج- مسئوليات مهندس الإشراف

تتحدد مسئوليات مهندس الإشراف عموما فى التأكد من أن المقاول يلتزم فى أداء أعماله بشروط التعاقد العامة والإدارية والفنية. وفيما يلى أهم أعمال مهندس الإشراف بالنسبة للمواصفات والاشتراطات الفنية للحفر وإتمام البئر وإختباره :

- تحديد موقع الحفر بدقة.
- التحقق من معدات الحفر والمواد المستعملة.
- المتابعة اليومية لعمليات الحفر مثل أخذ العينات من ناتج الحفر والتأكد من قطر الحفر.
- تحديد العمق النهائى للحفر على ضوء تحليل البيانات الحقلية المستقاة من العينات المستخرجة من الحفر والجس الجيوفيزيائى.
- إقرار التصميم النهائى للبئر بتحديد أعماق وأطوال المصافى بدقة.
- التحقق من إتمام أعمال البئر طبقا للتصميم الهندسي.
- ضبط عملية تنظيف وتطهير البئر.
- ضبط عملية تجربة الضخ.
- إجراء تحليل مبدئى لتجربة الضخ لتقرير ما إذا كانت هناك حاجة لاستكمال عملية تطهير البئر.
- ضبط عملية الإختبار النهائى للبئر.

وتجدر الإشارة إلى أن أعمال مهندس الإشراف غاية فى الأهمية إذ أنها تجنب المقاول الوقوع فى أخطاء كبيرة أثناء الحفر وإتمام البئر حيث يصعب تداركها وإصلاحها إلا بإعادة حفر البئر.

د- مستندات التعاقد

يشكل العقد الخطوط الرئيسية التى يتبعها مهندس الإشراف - ورغم أن الاشتراطات والمواصفات الفنية تكون جزءا من العقد فإنه يظل هناك الكثير من القرارات التى تترك لمهندس الإشراف ليتخذها أثناء التنفيذ. ويجب أن يقدم مهندس الإشراف هذه التعليمات مكتوبة للمقاول لتجنب أية مشاكل مستقبلية.

هـ- إختيار موقع الحفر

يقوم مهندس الإشراف بزيارة الموقع مصطحبا ممثلا لمقاول الحفر قبل البدء فى الأعمال بهدف :

- استكشاف موقع الحفر وسهوله الوصول إليه.
- الحصول على تأكيد من السلطات المحلية أو أهالى المنطقة لتجنب حدوث أى مشاكل فى حالة ما إذا كان موقع الحفر قد تحدد فى أملاك خاصة أو جبانات قديمة مثلا.
- وضع علامة على مكان الحفر المختار بدقة.
- الاتفاق مع مقاول الحفر على أخر موعد لوصول تجهيزات ومعدات الحفر.

١٠-٤-٤-٢ الزيارات المنتظمة للموقع والتقارير اليومية

يقوم مهندس الإشراف بعمل زيارات منتظمة لموقع الحفر حتى يستطيع الوفاء بالتزاماته الموضحة فى البند السابق. إضافة إلى أن على المقاول أن يملأ استمارات التقارير اليومية والتى تحتوى على معلومات تخص تقدم العمل ومتابعة وضبط أية مشاكل قد تحدث أثناء الحفر. وتعطى هذه التقارير اليومية مهندس الإشراف المعلومات المطلوبة عن الأعمال التى تم إنجازها منذ زيارته السابقة. ويستطيع مهندس الإشراف إعطاء تعليماته وتوجيهاته للمقاول اعتمادا على هذه التقارير وبناء على ما يقوم به من تفتيش وقياسات.

ويجب أن تقدم هذه التقارير اليومية لمهندس الإشراف المعلومات التالية :

- عمق منسوب سطح المياه فى بداية اليوم.
- قياسات منتظمة لسائل الحفر (اللزوجة والوزن النوعى) .
- تسجيل لكمية الإضافات المستعملة لسائل الحفر (عدد الشكاير فى اليوم وكمية الإضافات الأخرى).
- وصف مبدئى لناتج الحفر.
- بيانات محددة عن التغير فى قطر الحفر والتغير فى التتابع الطبقى والتغير فى معدلات الاختراق.

١٠-٤-٤-٣ تقرير البئر

بعد الانتهاء من تشطيبات البئر فإنه يلزم إعداد تقرير البئر ليضم جميع البيانات والمعلومات الهامة. ويعتمد هذا التقرير على استمارات التقارير اليومية ومشاهدات وملاحظات مهندس الإشراف. ويحتوى تقرير البئر غالبا على الأبواب التالية :

١- وصف مختصر لجيولوجية الموقع.
٢- وصف مختصر للأعمال التى تمت شاملة المشاكل التى تكون قد ظهرت أثناء الحفر ورسم بيانى لمعدل الاختراق.Penetration Rate
٣- وصف البئر بعد استكماله مع رسم توضيحى للبئر كما نفذ فعلا.
٤- نتائج وتحليل بيانات الجس الجيوفيزيائى لثقب الحفرة.
٥- نتائج وتحليل بيانات تجارب الضخ.
٦- بيانات عن نوعية المياه بالبئر بعد استكماله.

ومن المفيد تلخيص بيانات البئر على استمارة بيانات واحدة لكل بئر ، حيث تشكل مجموعة من هذه الاستمارات لمنطقة ما مصدرا شاملا للبيانات الرئيسية عن الآبار وتصبح ذات فائدة كمرجع سريع لأى شخص يحتاج إلى تلك البيانات.

١٠-٥ المواد والمهمات المستخدمة فى إنشاء الآبار

١٠-٥-١ غلاف البئر والمضخة Well and Pump Casing

المواد الأكثر شيوعا فى الاستعمال لغلاف البئر والمضخة هى الصلب قليل الكربون Carbon Steel Low والحديد المجلفن Galvanized Iron واللدائن P.V.C وتكون الوصلات عادة من القلاووظ Threaded Coupling أو من اللحام حتى يتحقق الكتم المائي.

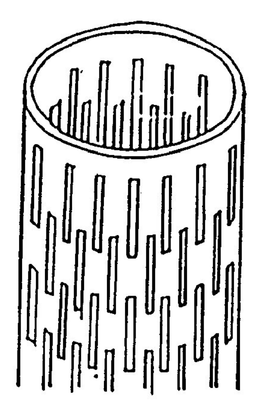
وتستخدم مواسير اللدائن P.V.Cعند احتمال حدوث مشاكل صدأ أو تآكل Corrosion or Incrustation . ويتم تركيب أذرع تمركز Centralizes لغلاف البئر والمضخة وكذلك للمصافى حتى يمكن تثبيت المواسير فى موضعها الصحيح داخل ثقب البئر.

١٠-٥-٢ المصافى ومصيدة الرمال Screen and Sand trap

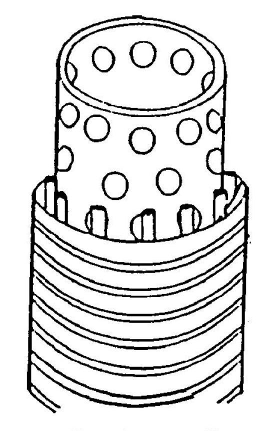
تقوم المصافى بدور رئيسى حيث أنها تحافظ على ثبات جدران ثقب الحفرة وتمنع دخول حبيبات الرمال داخل البئر كما تسهل حركة سريان المياه إلى البئر وداخله. وتختلف أنواع المصافى من مجرد ماسورة مثقبة Perforated إلى مصافى مصنعة بعناية من سلك ملفوف Wire Wound ويبين الشكل (١٠-١٤) والجدول (١٠-٢) الأنواع المختلفة للمصافى والمواد الأكثر استعمالا فى مصر.

وأهم ما فى مواصفات البئر هو مقاس الفتحة والنسبة المئوية لمجموع مساحة الفتحات. وفتحة المشقبية يجب ألا تقل عن ١ مم والنسبة المئوية لمساحة الفتحات تكون عادة ما بين ١٠ و ١٥ % من المساحة الكلية لجدران الماسورة ، أما مصافى المشقبية المستمرة فقد تصل فيها النسبة إلى ٣٠ - ٤٠ % . وتتعرض مصافى البئر على وجه التحديد إلى التآكل ، لذلك فإن المواد البلاستيكية وغير الحديدية non-ferrous كثيرا ما تستعمل لإطالة عمر البئر وكفاءته. ويبين الجدول (١٠-٣) المواد المستعملة فى المصافى مرتبة ترتيبا تصاعديا من ناحية السعر. ويترك دائما الجزء الأسفل من المصافى بدون ثقوب أو فتحات وذلك بطول يتراوح ما بين (٢ - ٥) متر بحيث يسمح بترسيب الرمال بداخلها (مصيدة الرمال).

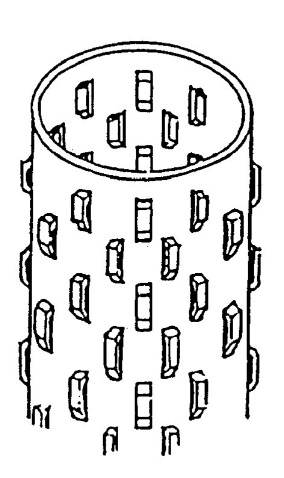
1. Slotted



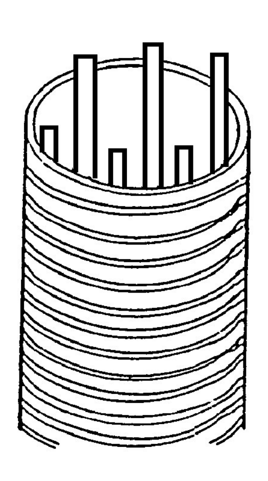
2. Pipe Base Screen



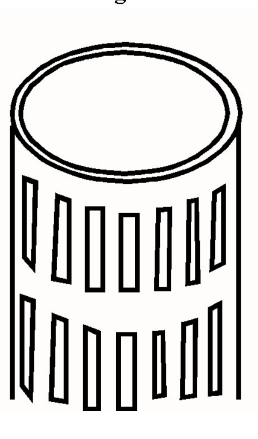
3. Bridge Slotted



4. Continuous Slotted



5. Rigid PVC



شكل (١٠-١٤) أنواع المصافى

١- مشقبيات . ٢- شبكة مثبتة على ماسورة.

٣- مشقبيات كوبري. ٤- مشقبية مستمرة.

٥- جاسئة غير معدنية.

جدول (١٠-٢) الأنواع المختلفة للمصافى ومواد تصنيعها

النوع	المادة
المشقبيات Slotted	صلب قليل الكربون أو P.V.C
ماسورة مثقبة بشبكة من سلك ملفوف	صــلب كربونــى Carbon Steel بسـلك حديـد
Pipe Base Screen	مجلفن (Galvanized Iron)
مشقبيات كوبرى Bridge Slotted	صلب قليل الكربون
مصافى المشقبية المستمرة Continuous Slot	صلب لا يصدأ
مصافى جاسئة من اللدائن Rigid P.V.C	P.V.C

جدول (١٠-٣) ترتيب تصاعدى من حيث السعر للمواد المستخدمة فى صناعة المصافى

المادة	المقاومة ضد الأحماض	مقاومة التآكل فى المياه الجوفية العادية
صلب قليل الكربون	ضعيف	ضعيف
P.V.C	جيد	جيد
صلب لا يصدأ	جيد	جيد

١٠-٥-٣ مواد الغلاف الزلطى Gravel Pack Materials

فـى البـند (١٠-٣-١-١) تـم وصـف تكـوين الغـلاف الزلطـى وسـمكه ، ويجـب مـراعاة أن تكـون المـواد المختارة للغلاف الزلطى من الرمال الخشنة والزلط المستدير كما يجب التأكد من نخله وغسله.

١٠-٥-٤ مواد الكتم المائى Seals

يتم إحكـام الآبـار بسد الفراغ البينـى المحيط بغلاف البئر لحمايته من التلوث لمنع دخول مياه ذات نوعيه غير مرغوبة من سطح الأرض إلى داخل البئر ولحماية غلاف البئر من التآكل الخارجى ولحفظ طبقات طينية بين الطبقات الحاملـة للمياه. ويستخدم فـى الإحكـام مـواد مختلفة يكون لهـا خاصـية التماسك Bindingمثل الأسمنت البورتلاندى والطين والبنتونات والبيتومين وغيرها.

١٠-٥-٥ البلوكات الخرسانية وفوهة البئر وغرفة المضخة Concrete Blocks, Well Head and Pump House

يجب عمل حماية مؤقتة للبئر إذا لم يتم تشطيب فوهة البئر وبناء غرفة المضخة مباشرة بعد إختبار البئر ويكون ذلك عن طريق حماية نهاية غلاف البئر المفتوحة عند قمة البئر وحتمية أقفالها بإحكام بواسطة غطاء يثبت باللحام أو القلاووظ Welded or Screwed Cap مع التخلص من جميع المواد المتبقية من عمليات الحفر والإنشاء والتى تكون مصدرا محتملا للتلوث.
وتكون لفوهة البئر وغرفة المضخة المتطلبات التالية :

- تأمين الحماية من التلوث.
- تسكين المعدات الميكانيكية والكهربية.
- السماح بسهولة عمليات التشغيل والصيانة.

وتشيد غرفة المضخة كليا أو جزئيا تحت سطح الأرض أو كليا فوق سطح الأرض ، ويعتمد الإختيار عموما على نوع وعمق منسوب المياه الأرضية وظروف الموقع.

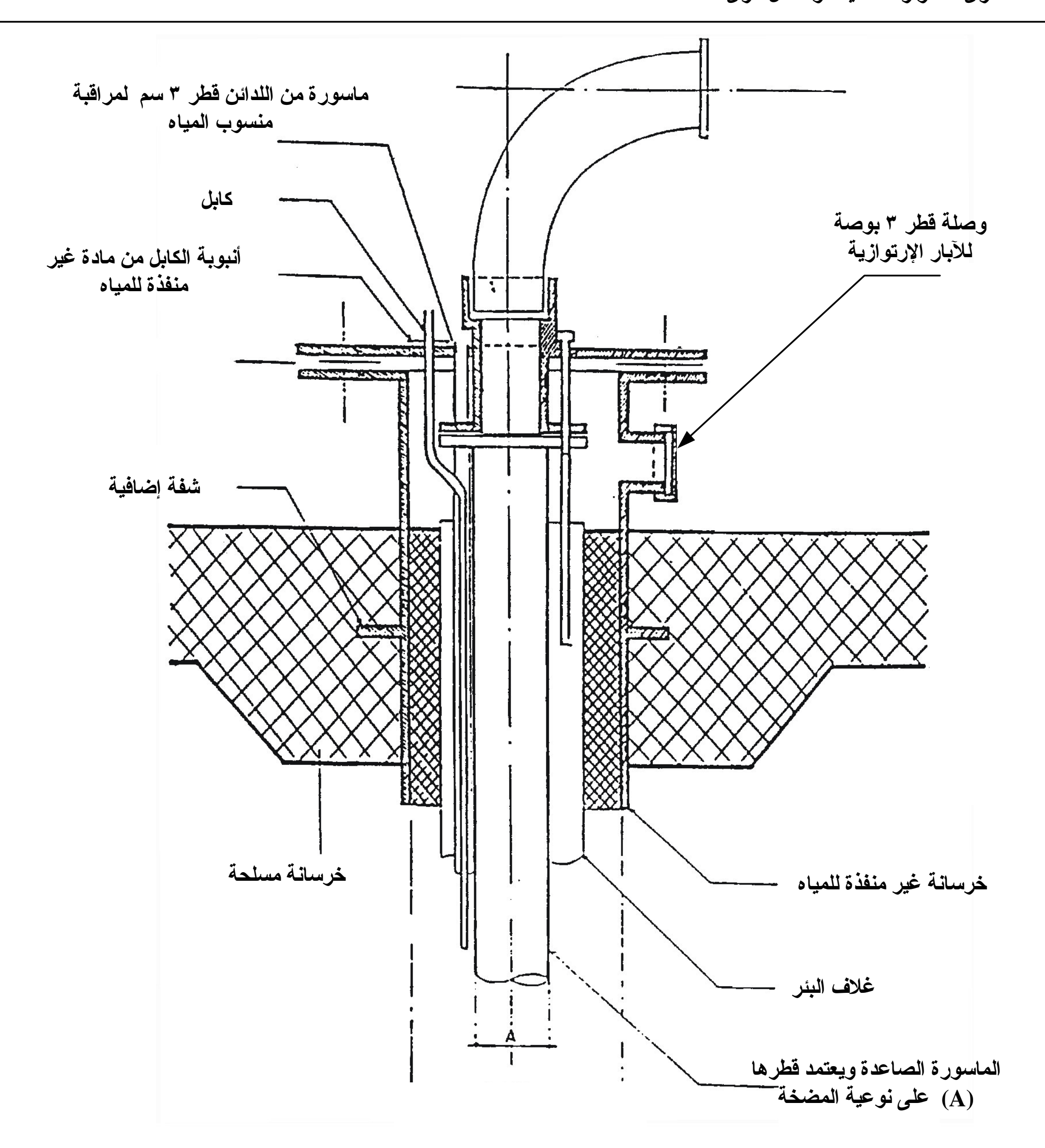
ويبدأ التشييد بتركيب فوهة البئر وأرضية بيت المضخة والتى تكون غالبا من الخرسانة المسلحة ، ويتم إحكام فوهة البئر فى الأرضية كما هو مبين فى الشكل (١٠-١٥) ويكون لغطاء فوهة البئر فتحات غير منفذة لتمرير الكابل الكهربائى (فى حالة المضخات الغاطسة) ولتثبيت أنبوب قطر ٣ سم يسمح بمراقبة منسوب المياه أثناء التشغيل ، ويتم أولا الانتهاء من تشييد حوائط وسقف غرفة المضخة قبل عمل التركيبات ، وتكون أبعادها بالقدر الذى يتيح عملية التركيبات بيسر. وتتكون التركيبات من الأجزاء والمعدات التالية الموضحة فى الشكل (١٠-١٦).

- المضخة.
- الماسورة الصاعدة Rising Pipe أو ماسورة الشفط Suction Pipe .
- صمام عدم الرجوع Non-return Valve .
- مقياس الضغط Pressure Gauge .
- فتحة الأدوات Probe Tap .
- عداد قياس التصرف Water Flowmeter .
- صمام Valve .
- المعدات الكهربية (لوحة التحكم - الكابلات).

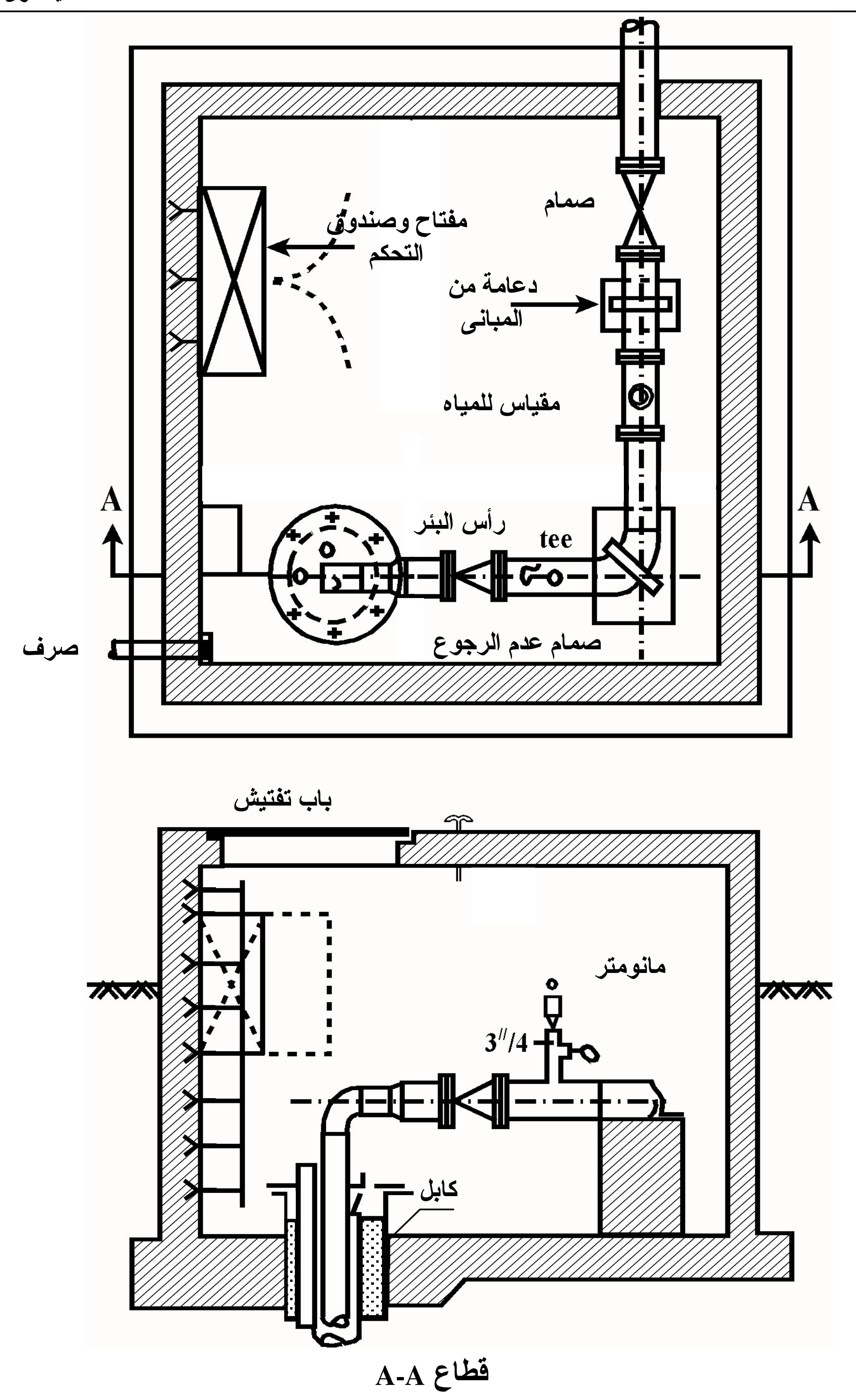
ويجب الانتباه إلى وسائل الصرف خاصة للمنشآت الواقعة تحت الأرض ، والتهوية ومعدات الأمان Safety Tools ، كما يجب أن يسمح المنشأ بعمل جميع التركيبات والإزالة بما فيها المضخة بتزويده بفتحة خاصة Manhole ويفضل أن تزود لوحة التحكم عند موقع البئر بما يلى :

- حماية من إنخفاض منسوب المياه (مفتاح قفل ومؤشر Switch off and Indicator).
- حماية حرارية (مفتاح قفل ومؤشر Switch off and Indicator).
- عداد قياس التيار الكهربى (Currentmeter) .
- عداد قياس الجهد (Voltmeter) .
- عداد قياس ساعات التشغيل.

ويسمح عداد التصرف بقياس إجمالى كميات المياه التى يتم ضخها لفترات طويلة (شهر - سنة) حتى يمكن حساب التصرف المتوسط. ويستخدم صمام عدم الرجوع فى حالة توصيل بئرين أو أكثر لماسورة توصيل واحدة لمنع مرور المياه فى الاتجاه العكسى عند غلق أحد الآبار ، ويجب دائما تركيب صمام عدم الرجوع بين البئر وعداد التصرف. ويتم التحكم فى تصرف المضخة بواسطة صمام بوابة Gate or Sluice Valve والذى يفضل عن صمام Butterfly or Ball Valves ويتم رصد مقدار الضاغط فى ماسورة التصرف بواسطة مقياس الضغط بالإضافة إلى وجود فتحة لأخذ عينات من المياه أثناء التشغيل.



شكل (١٠-١٥) تشييد فوهة البئر



قطاع A-A

شكل (١٠-١٦) تشييد غرفة المضخة

١٠-٦ تشطيب وتنمية الآبار

١٠-٦-١ تشطيب البئر Well Completion

بعد الوصول بالحفر إلى العمق المطلوب فإنه يتم استنتاج وصف التتابع الطبقى بالموقع اعتمادا على عينات نتائج الحفر ونتائج تحليل الجس الجيوفيزيائى.

وبناء على هذا الوصف لتتابع الطبقات فإنه يتم تحديد أماكن المصافى بدقة وكذلك يلزم مراجعة مواصفات المصافى (الأطوال ونسبة الفتحات ومقاس الفتحة) ومادة الغلاف الزلطى. ويجب أخذ ملاحظات أثناء تركيبات البئر عن المواد ودقة التنفيذ. ويتم الاحتفاظ بسجل عن كل بئر يبين وصف المراحل المختلفة لتنفيذ البئر والوقت اللازم للانتهاء من العمل ويجب أن يتم تنظيف البئر فور الانتهاء من تركيبات المصافى والجدار المصمت (قميص البئر Casing) والغلاف الزلطى وأى تأخير فى بدء عملية تنظيف البئر تؤدى إلى ترسيب سائل الحفر بالغلاف الزلطى مما يزيد من صعوبة تنظيفه. وعادة تتم عملية التنظيف بواسطة رفع الهواء بالضخ ويستمر حتى يصبح الماء الذى يتم ضخه خاليا من الرمال وتكون عملية التنظيف أكثر فاعلية إذا تم رفع الهواء بشكل متقطع أى غير متواصل.

١٠-٦-٢ تنمية البئر Well Development

بعد الانتهاء من عملية تشطيب البئر فإنه يتم تنميته بهدف زيادة تصرفه النوعى Specific Capacity (التصرف لوحدة أطوال المصافى) ومنع تراكم حبيبات الرمل داخله والحصول على أقصى عمر اقتصادى للبئر.

ويتم الوصول إلى هذه النتائج عن طريق إزالة المواد الدقيقة من داخل مسام التكوينات الجيولوجية الطبيعية المحيطة بالأجزاء التى بها مصافى من البئر. وعندما يزود البئر بغلاف زلطى فإن أكثر هذه النتائج تتحقق ومع ذلك فإن عملية تطهير البئر تظل ذات فائدة.

وهناك طرق مختلفة لتنميه البئر منها الضخ والتمور (الكبس) Surging وضخ المياه بالهواء المضغوط والنفاث الهيدروليكى وإضافة المواد الكيماوية.

١٠-٦-٢-١ التنمية بطريقة الضخ Pumping

فى هذه الطريقة يتم ضخ الماء من البئر على مراحل مختلفة بداية بتصرف منخفض ووصولا إلى تصرف يتعدى معدل التصرف التصميمى.

ويجرى ضخ الماء فى كل مرحلة حتى يصير خاليا من المواد العالقة فيتم إيقاف المضخة ويعود عامود الماء الموجود بماسورة المضخة بالتثاقل إلى البئر ، وتكرر هذه المرحلة بإعادة الضخ حتى يظهر الماء الخالى من المواد العالقة فقط. عندئذ يتم رفع معدل التصرف وتكرر نفس الخطوات حتى الوصول إلى أقصى تصرف للمضخة أو للبئر.

١٠-٦-٢-٢ التنمية بطريقة التمور (الكبس) Surging

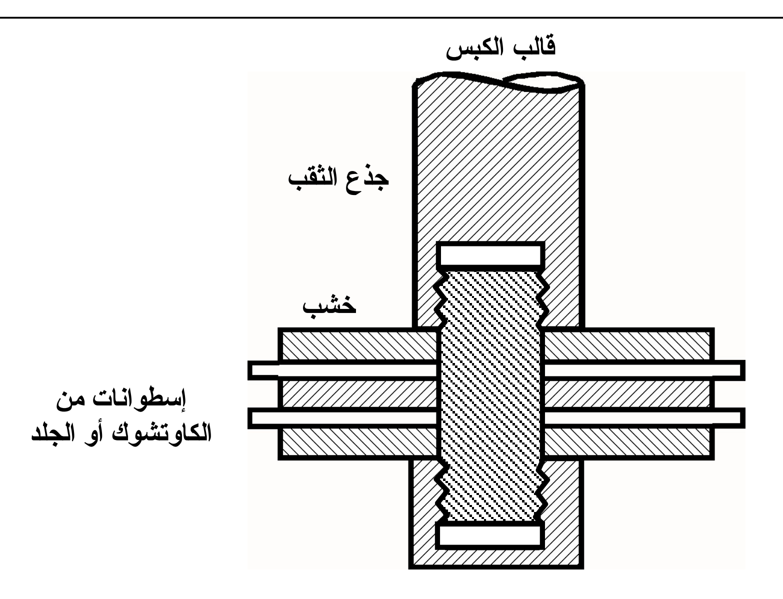
يوضح الشكل (١٠-١٧) طريقة التمور حيث تتم التنمية باستخدام ثقل خشبى أسطوانى كما هو مبين بالشكل (١٠-١٨) يثبت فى نهاية ماسورة الحفر ويحرك إلى أعلى وأسفل فى حركة ترددية ويكون قطر الثقل الأسطوانى أقل بمقدار من ٢ إلى ٥ سم من قطر المصافى ويحزم بالكاوتشوك أو بالجلد حتى لا تصاب جدران المصافى ، وتحدث حركة الثقل إلى أسفل عملية غسيل عكسى لخلخلة أية تكوينات رملية

Bridging قد تحدث أمام المصافى بينما تؤدى حركة الثقل إلى أعلى الى أعلى الى مرور حبيبات الرمال المفككة إلى داخل البئر كما فى الشكل رقم (١٠-١٩).

١٠-٦-٢-٣ التنمية بطريقة ضخ المياه بالهواء المضغوط Airlift Pumping

يتم توصيل جهاز ضغط الهواء بماسورة هواء توضع فى البئر ومعها ماسورة هواء أخرى قصيرة وصمام ثلاثي. كما هو موضح فى الشكل (١٠-٢٠) وتوضع ماسورة تصرف الهواء داخل ماسورة الماء وبالسماح للهواء المضغوط بالمرور فى ماسورة الهواء الطويلة فإنه يدفع الهواء مع الماء إلى خارج البئر من خلال ماسورة تصرف الماء. وبعد ما يصبح الماء خاليا من الشوائب يقفل تدفق الهواء ويسمح للماء بالعودة إلى المنسوب الأستاتيكى. بعد ذلك يضبط الصمام الثلاثى ليسمح للهواء بالوصول إلى أعلى البئر من خلال ماسورة الهواء القصيرة. وتؤدى هذه العملية إلى غسيل البئر عكسيا من خلال ماسورة تصرف الماء وفى نفس الوقت تعمل على خلخلة حبيبات الرمال المحيطة بالبئر. عندئذ يضغط الهواء إلى البئر وتكرر نفس الخطوات حتى تتم تنمية البئر تماما.

شكل (١٠-١٧) طريقة التنمية بالتمور (الكبس)



شكل (١٠-١٨) الثقل المستخدم فى طريقة الكبس

١٠-٦-٢-٤ التنمية بطريقة النفاث الهيدروليكى Hydraulic Jetting

يثبت الباشبورى Nozzle والنفاث فى وضع أفقى داخل البئر (شكل رقم ١٠-٢١) على ماسورة توصيل عن طريق خرطوم بمضخة ذات ضغط عالى وتصرف كبير ، ويحرك النفاث دائريا ببطىء ومرحليا إلى أعلا ويحمل تصرف الماء المضطرب الحبيبات الناعمة من التكوينات غير المندمجة والحاملة للمياه إلى البئر ، وتكون هذه الطريقة مجدية على وجه التحديد فى حالات تنمية الآبار المزودة بغلاف زلطى.

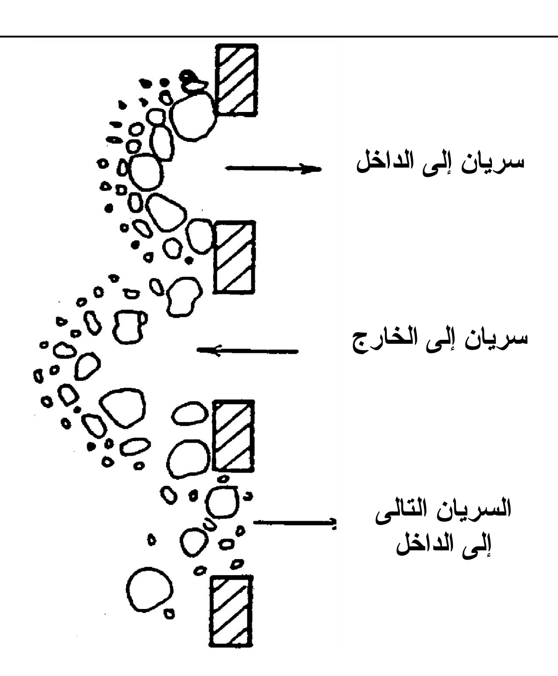
١٠-٦-٢-٥ التنمية بالكيماويات Chemicals

يوجد تأثير فعال لبعض الكيماويات مثل البوليفوسفات (كالجون) أو هيدروكلوريد الصوديوم على تشتيت حبيبات الطين والطمى ، لذلك فإنه من السهل على هذه الكيماويات أن تحطم الخواص الجيلاتينية لسائل الحفر الطينى - ويتم ذلك بصب المحلول خلال ماسورة ذات قطر صغير ، ويجب إجراء عملية (كبس Surging) حتى يتم غسل وطرد الكيماويات من خلال المصافى إلى التكوين الجيولوجى. مع الأخذ فى الاعتبار التأثيرات البيئية المترتبة عليها ومراعاة حدود الأمان.

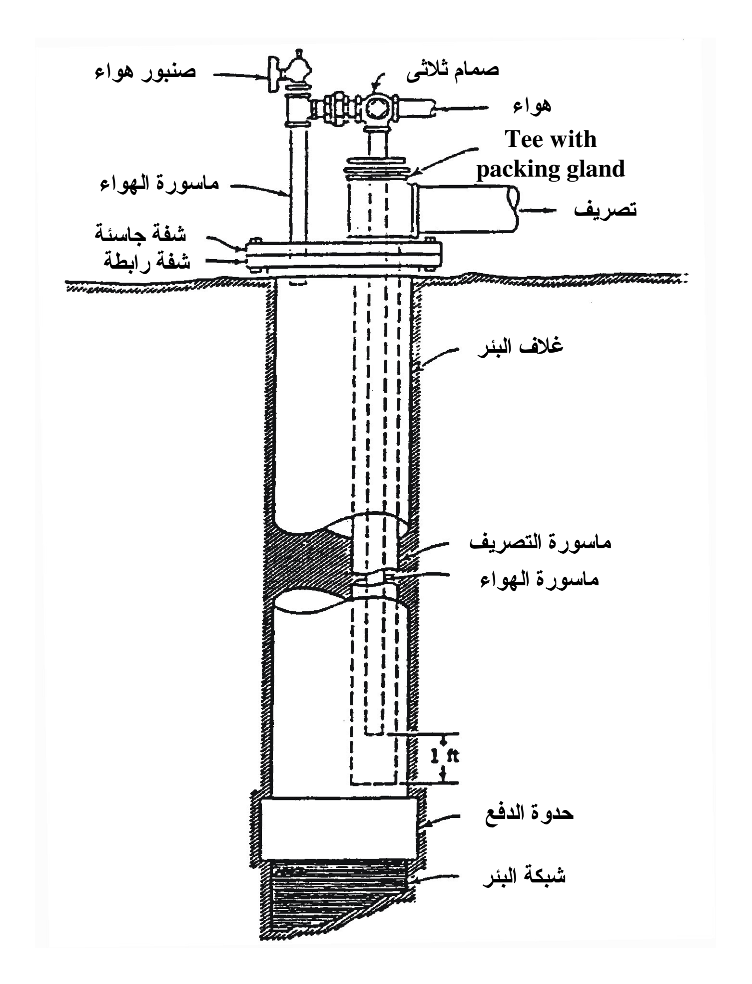
١٠-٦-٣ مسئوليات المشرف على تنمية البئر

تتحدد مسئوليات المشرف على تنمية البئر فيما يلى :

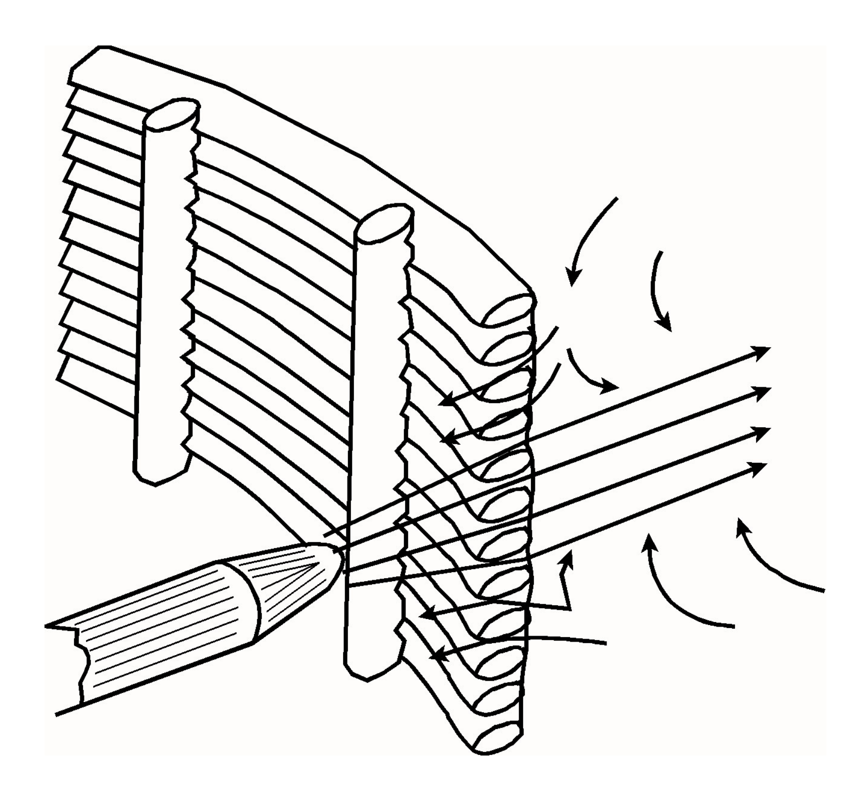
- الحكم على حالة البئر المنتهى قبل تنميته بناء على التقارير اليومية وملاحظاته أثناء الإشراف على التنفيذ.
- تحديد طريقة تنمية البئر التى سوف تستعمل وذلك بالتشاور مع المقاول.
- متابعة التحسن المستمر أثناء عملية تنمية البئر - وتقرير ما إذا كانت التنمية قد اكتملت بالفعل.
- ويصير الحكم على حالة البئر بناء على المؤشرات التالية :
  * التصرف النوعى للبئر (متر مكعب / ساعة / متر).
  * الفرق بين منسوبى سطح المياه الديناميكى فى البيزومتر الذى يخترق الغلاف الزلطى (فى حالة وجوده) وفى داخل البئر.
  * التفتيش بمجرد النظر عن نوعيه المياه.
- العوامل الطبيعية مثل درجة الحرارة واللزوجه والوزن النوعى.



شكل (١٠-١٩) خلخلة حبيبات الرمل بطريقة الكبس



شكل (١٠-٢٠) ضخ المياه بالهواء المضغوط



Airlift pumping and bydraulic jetting

شكل (١٠-٢١) الضخ بالهواء المضغوط والنفاث الهيدروليكى

١٠-٧ تشغيل وصيانة وإعادة تأهيل الآبار

تهدف عمليات تشغيل وصيانة الآبـار إلـى ضمان إمدادات المياه إلـى المزارعين بالكميات المطلوبة والنوعية المقبولة وفى الأوقات المحددة بأسلوب اقتصادي.

١٠-٧-١ تشغيل الآبار

تشغيل البئر المنفرد يستدعى التأكد من جميع التركيبات وقراءة عداد التصرف ومنسوب سطح المياه قبل إدارة المضخة وضبط التصرف بواسطة المحبس ومراجعة لوحة التشغيل. وفى حالة تشغيل مجموعة من الآبار فإنه يتم تشغيل الآبار واحدا بعد الأخر مع إتباع الخطوات الإضافية التالية :

- يغلق محبس خط الأنابيب الرئيسي.
- تغلق جميع محابس رؤوس الآبار.
- يتم تشغيل البئر الواقع فى نهاية خط الأنابيب.
- ينتظر حتى يتم ملء خط الأنابيب تماما وبالتالى يبدأ الضغط فى الارتفاع عند محبس خروج المياه من الخط.
- يتم تشغيل الآبار بالتتابع ويفتح محبس خروج الماء.
- يتم ضبط جميع المحابس عند رؤوس الآبار حتى يصبح تصرف كل بئر مطابقا لبرنامج التشغيل.

ويتم بصفة دورية رصد منسوب المياه داخل البئر وقراءة عدادات التصرف والضغط والفولت والأمبير.

١٠-٧-٢ صيانة الآبار

إن صيانة الآبار هامة لضمان استمرارية إمدادات المياه بحيث تكون جميع الآبار قادرة على العمل بصورة جيدة فى جميع الأوقات ، ويجب أن يكون العمر الزمنى لأى معدة أطول ما يمكن وأن تعمل بكفاءة عالية لخفض تكاليف التشغيل بخفض استهلاك الطاقة. وهناك عدة أنواع للصيانة :

١٠-٧-٢-١ الصيانة الوقائية Preventive Maintenance

وتجرى عملياتها بانتظام وعلى فترات تتوقف على استعمال المعدة. وتستدعى الصيانة الوقائية إحلال وتبديل الأجزاء التى يصيبها التآكل لتفادى حدوث أعطال أو انكسار.

١٠-٧-٢-٢ الصيانة الإصلاحية Corrective Maintenance

وتتم عندما تحدث أعطال فى التشغيل بسبب عطب أحد أجزاء التركيبات حيث يلزم إجراء الإصلاحات اللازمة.

١٠-٧-٢-٣ الصيانة الشاملة Overhaul

والتى تتم على فترات طويلة ومحددة مسبقا وهى عادة تكون مكلفة ومعقدة.

وعناصر الصيانة الرئيسية هى التفتيش لتحديد حالة المعدة وعمل تشحيم للأجزاء الدوارة فى المواعيد المحددة مع استعمال الزيوت الملائمة من حيث النوعية والكمية كما يجب ضبط أجزاء التركيبات المختلفة للتأكد من عملها بصورة جيدة على أن يتم ذلك طبقا لقواعد ونظام التشغيل. ويراعى التنظيف المستمر.

١٠-٧-٣ متابعة أداء البئر

إن تجميع بيانات عن أداء الآبار من خلال برنامج متابعة أداء الآبار لا غنى عنه لتأمين المورد المائى مستقبلا. ويشتمل هذا البرنامج على :

- قياس تصرف البئر (Q) ومقدرا الهبوط (S) فى البئر الإنتاجى مرة كل شهر.
- رصد منسوب سطح المياه الأستاتيكى فى آبار الملاحظة مرة كل ثلاثة أشهر.
- قياس التوصيل الكهربى للمياه (EC) للآبار الإنتاجية مرة كل ثلاثة أشهر.
- قياس محتوى أملاح الصوديوم والكالسيوم والماغنسيوم فى مياه الآبار الإنتاجية مرة كل سنة.

١٠-٧-٤ إعادة تأهيل الآبارWell Rehabilitation

١٠-٧-٤-١ الأعمال الابتدائية والاستقصاءات

إذا حدث تناقص ملحوظ فى إنتاجية البئر أو إذا تزايد مقدار الهبوط فى منسوب المياه داخل البئر فإنه يلزم عمل تحريات لمعرفة ما إذا كانت هناك حاجة لتحديث البئر. وقبل البدء فى أى عمل من أعمال تحديث البئر يكون من الضرورى جمع بيانات عن الحالة الحاضرة للبئر. وتشتمل هذه البيانات على :

- منسوب الماء الأستاتيكى.
- منسوب الماء أثناء الضخ.
- مقدار الضغط فى أنبوب توصيل المياه بعد المضخة مباشرة.
- مقدار التصرف.
- عدد ساعات التشغيل.
- حالة النظام والتوصيلات الكهربية.
- حالة المضخة.

وفى حالة عدم توافر البيانات عن نوعيه المياه فإن الأمر يقتضى إجراء تحليل كيميائى شامل. وأهم العوامل التى يجرى تحديدها : التوصيل الكهربى ، درجة الحرارة ، الملوحة ، القلوية ، PH ، الشوائب الصلبة ، الكلوريدات ، الحديد ، المنجنيز ، ثانى أكسيد الكربون والكبريتات.

ومن الممكن الحصول على معلومات عن تناقص إنتاجية البئر عن طريق أقرب بئر ملاحظة والبيزومتر المثبت فى الغلاف الزلطى للبئر الإنتاجى مثل الحالات الآتية :

- إذا كان الهبوط فى منسوب المياه فى بئر الملاحظة وفى بيزومتر الغلاف الزلطى وفى البئر الإنتاجى نفسه متساويا تقريبا فإن ذلك يعنى أن هناك هبوطا عاما فى منسوب المياه الجوفية بالمنطقة وأن حالة البئر لم يطرأ عليها أى تغير.
- إذا لم يحدث أى هبوط فى منسوب سطح المياه فى أقرب بئر ملاحظة بينما حدث هبوط متساوى فى منسوب المياه فى كل من بيزومتر البئر الإنتاجى وكذلك البئر الإنتاجى فإن ذلك يشير إلى حدوث انسداد عند جدران حفرة البئر Borehole Face كما هو موضح فى الشكل (١٠-٢٢).
- إذا لم يحدث هبوط فى منسوب سطح المياه فى أقرب بئر ملاحظة أو فى بيزومتر البئر الإنتاجى بينما كان هناك فرق ملحوظ بين منسوب المياه فى بيزومتر البئر الإنتاجى والبئر الإنتاجى نفسه فإن ذلك يبين حدوث انسداد فى المصافى كما هو موضح فى الشكل (١٠-٢٣).

وبعد رفع المضخة من البئر يجب أولا التحقق من عمق البئر ، فإذا كان جزء من البئر قد ملئ بالرمال فإنه يلزم محاولة استخراج بعضها قدر المستطاع. كما يلزم أن تشتمل الاستقصاءات على التفتيش عن حالة غلاف البئر والوصلات ووجود أية عوائق.

ويجب جمع معلومات عن الحالة الجيوهيدرولوجية للبئر بواسطة إختبار هبوط الخطوة. حيث يمكن مقارنة نتيجة الإختبار ، الذى يظهر فى صورة منحنى العلاقة بين التصرف والهبوط ، بنفس المنحنى الذى تم رصده بعد تشطيب البئر.

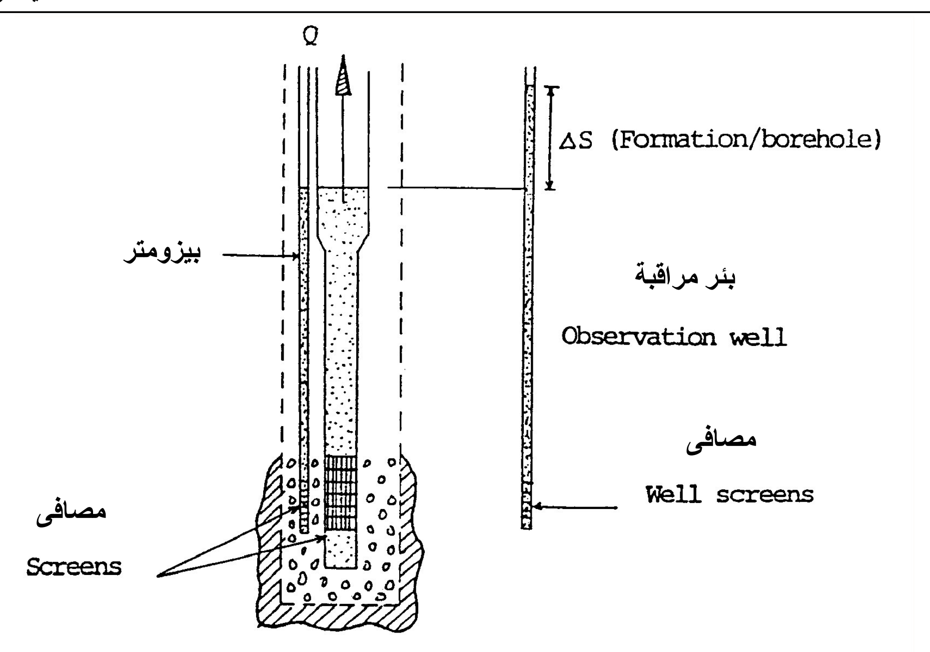
١٠-٧-٤-٢ أسباب انخفاض إنتاجية البئر

بناء على البيانات والمعطيات التى تم الحصول عليها يمكن استنتاج أسباب انخفاض إنتاجية البئر ويمكن بعد ذلك إختيار طريقة العلاج المناسبة لإعادة تأهيل وتحديث البئر.

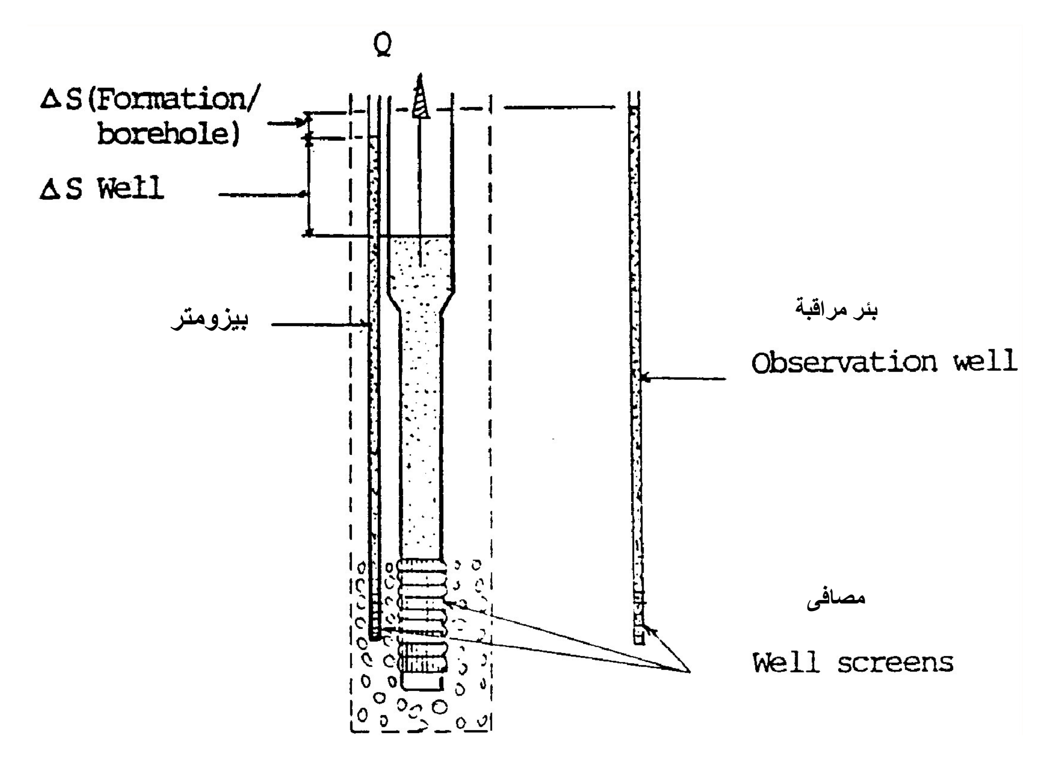
وفيما يلى الأسباب الرئيسية لانخفاض إنتاجية البئر :

- انهيار ميكانيكى للبئر.
- انسداد كيميائى (تآكل Corrosion - أكسدة Incrustation)
- انسداد بكتريولوجى.

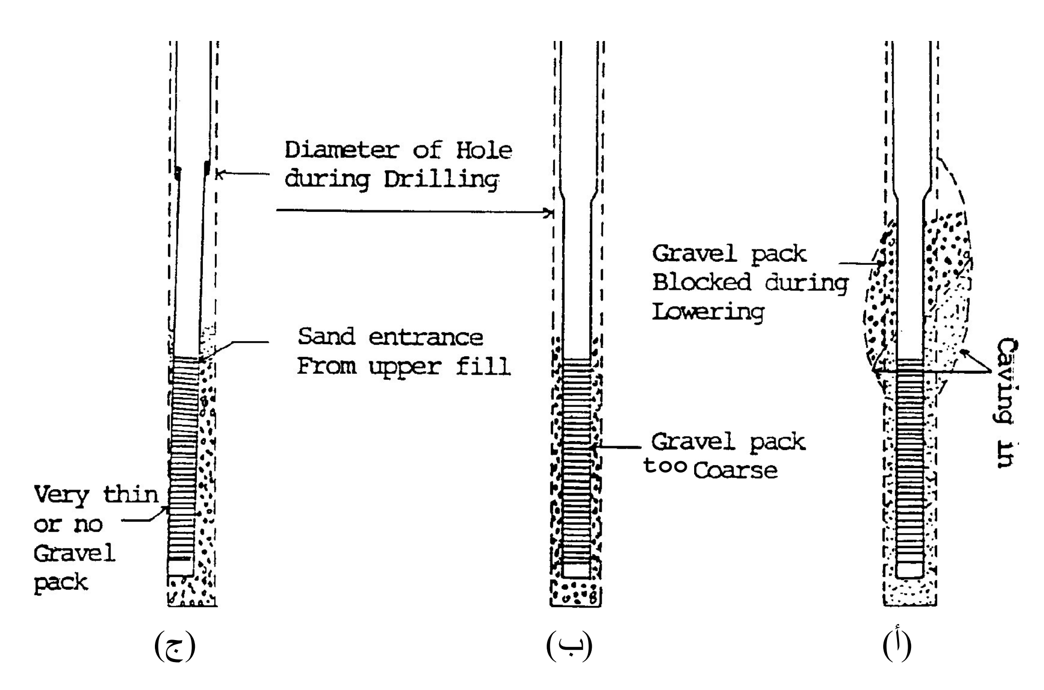
ويصور الشكل (١٠-٢٤) بعض الأسباب التى يحدث معها انخفاض فى إنتاجية البئر أو ضخ رمال. وتجدر الإشارة إلى أن حساب الفوائد والتكاليف توضح ما إذا كان إعادة تأهيل البئر سيكون مجدى اقتصاديا من عدمه (فى حالة قلة تكاليف الإنشاء قد يكون من الأفضل إحلال البئر بالكامل).



شكل (١٠-٢٢) انسداد عند مكان حفرة البئر



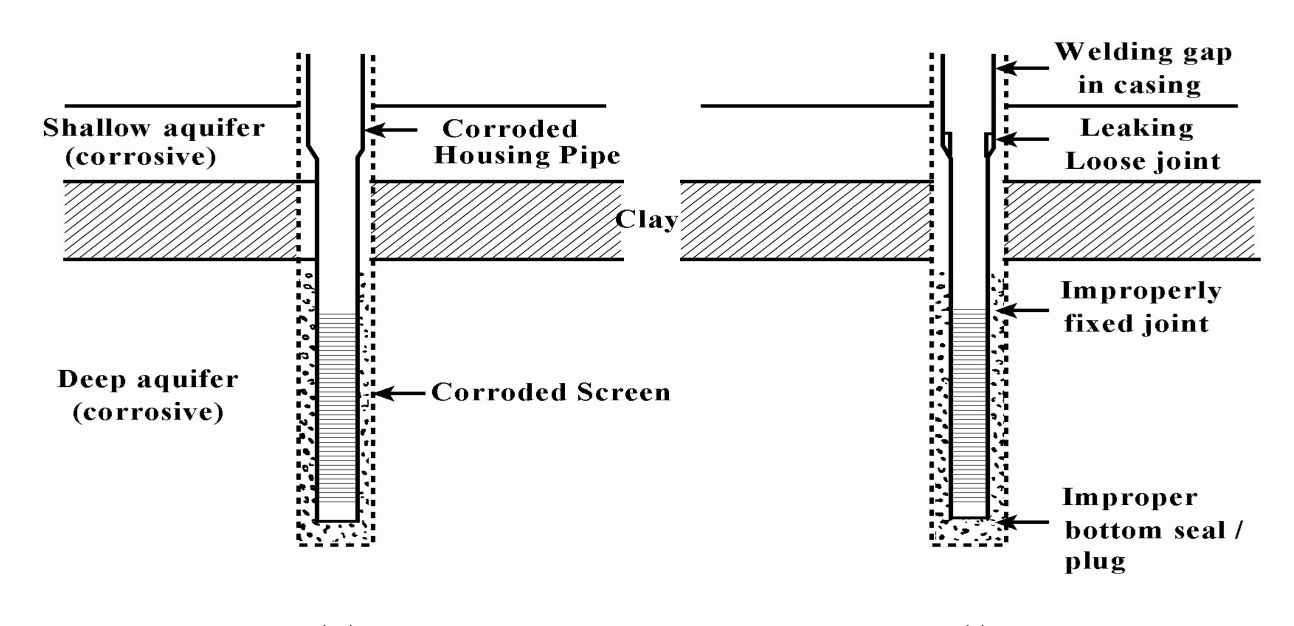
شكل (١٠-٢٣) تكون طبقات رقيقة تسبب انسداد المصافى



- انسداد الغلاف الزلطى فوق منسوب المصافى
- حدوث تكهف جزئى

- حبيبات الغلاف الزلطى كبيرة
- فتحات المصافى كبيرة

- حفرة البئر غير رأسية
- محور البئر غير متمركز مع محور الحفرة
- طول الغلاف الزلطى غير كاف



(د)
فتحات فى اللحام أو وصلات غير محكمة

(هـ)
تآكل المصافى

شكل (١٠-٢٤) أسباب ميكانيكية لانخفاض إنتاجية البئر وضخ الرمال

١٠-٧-٤-٣ طرق إعادة تشغيل البئر

هناك عدة تقنيات يمكن استعمالها لإعادة تشغيل البئر وهى طرق التنظيف الميكانيكى والضخ ورفع الهواء والتنظيف الكيميائى وبيانها كالتالى :

أولا : التنظيف الميكانيكى Mechanical Cleaning

ويتم التنظيف الميكانيكى بواسطة فرشاة واحدة أو مجموعة فرش تثبت فى ماسورة (قطرها بوصة أو نصف بوصة) ، ولأن هذه التركيبة ثقيلة الوزن فإن سرعة التنظيف رأسيا بواسطتها غير ممكن ، وعلى الرغم من أن تأثير التنظيف الميكانيكى بسيط وأن هذه العملية ثقيلة فى أداءها إلا أنها غير معقدة.

ثانيا : الضخ ورفع الهواء Pumping and Air Lifting

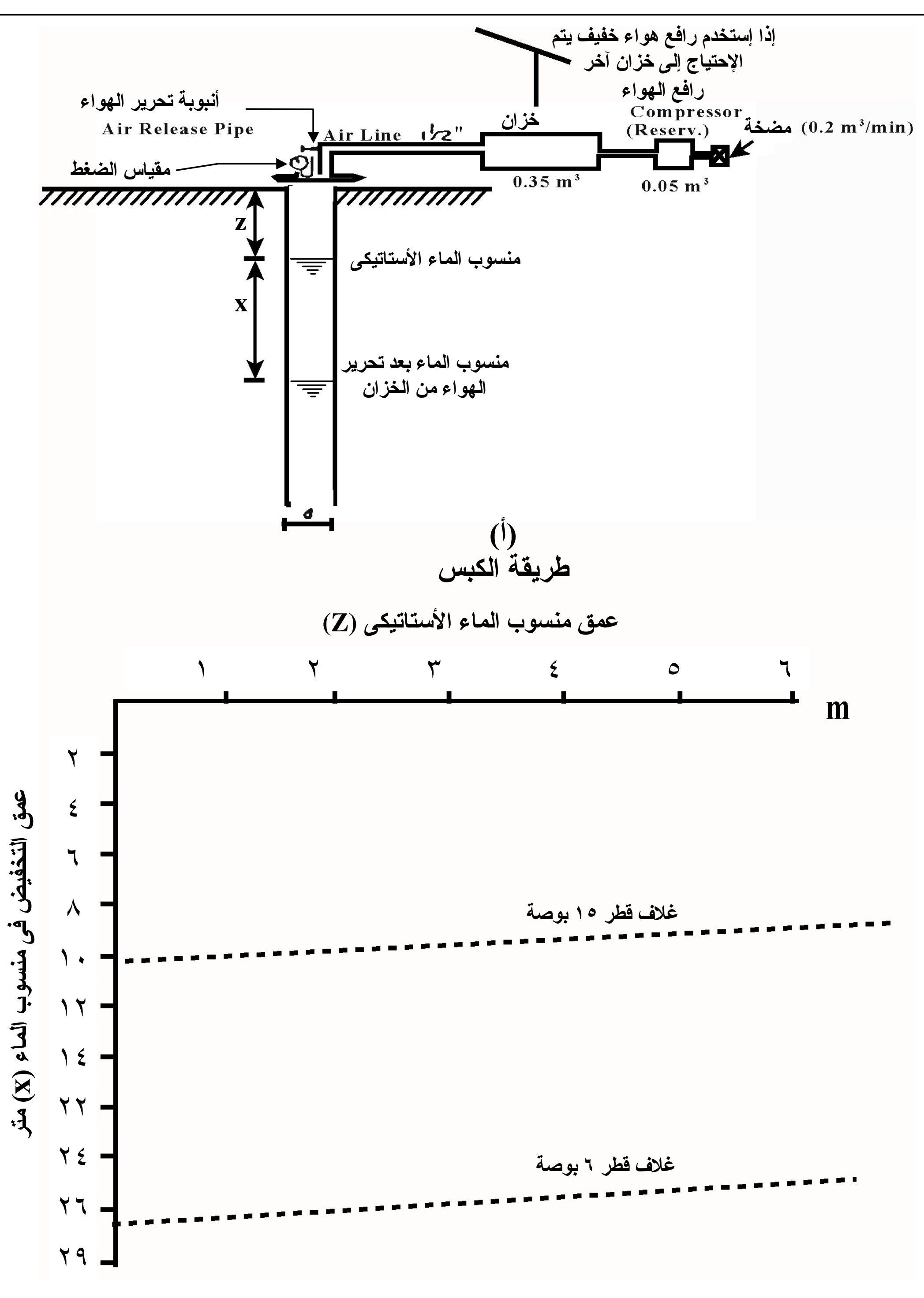
أ- الضخ الزائد أو ضخ قطاعات من البئر
Over Pumping or Section-Wise Pumping

إذا تم إحداث سرعة عالية قرب المصافى فإن الحبيبات الدقيقة فى التكوين الجيولوجى خارج المصافى مباشرة سوف تندفع نحو البئر. ويمكن زيادة التأثير عن طريق الضخ بالصدمات Shock-Wise (مثلا ٥ دقائق ضخ بأقصى تصرف يتبعها ١٠ دقائق استعاضة Recovery) ويكون لهذه الصدمات تأثير فعال على تحطيم الكبارى Bridges التى تتكون من الحبيبات الدقيقة بين الحبيبات الخشنة حول المصافى. وإذا كانت قدرة المضخة غير كافية لضخ الطول الكلى للمصافى أو إذا كان الانسداد مركزا فى أجزاء معينة فقط من المصافى فإن التنظيف بالقطاعات Wise Cleaning Section يعطى نتائج جيدة.

ب- الكبس ورفع الهواء Surging and Air-Lifting Compressor

إن الكبس بواسطة الهواء المضغوط لا يسبب فقط تيارا عكسيا خلال المصافى بل يحدث أيضا موجة تصادمية داخل البئر. ويبين الشكل (١٠-٢٥-أ) عناصر هذه الطريقة بينما يظهر الشكل (١٠-٢٥-ب) العلاقة بين انخفاض منسوب المياه داخل البئر وعمق الماء الأستاتيكى لحالتين لقطر غلاف البئر ٦ ، ١٥ بوصة. وطريقة الكبس مناسبة لإعادة ترتيب حبيبات الرمل والزلط خارج المصافى حيث تسمح بتحرر حبيبات الرمل الناعم والسلت والتخلص منها.

كما أن إستخدام رفع الهواء ونفث الهواء Air-Jetting بالتبادل يعمل أيضا على تنظيف البئر. فيعمل نفث الهواء على خلخلة الطبقة الخفيفة Light Incrustation ثم يتم التخلص من الحبيبات بالضخ برفع الهواء وتكون الموجة التصادمية الناشئة أثناء النفث Jetting أقل فاعلية عن الموجة التصادمية التى يسببها الكبس بالهواء المضغوط.



(ب)

التخفيض الموصى عليه لسطح الماء

شكل (١٠-٢٥) الكبس باستخدام الهواء المضغوط

ج- النفث المائى Water Jetting
يصبح النفث المائى مناسبا على وجه الخصوص فى حالة الانسداد بواسطة الرمل الناعم - الطمى - الطين. وفى هذه الحالة تكون عملية إعادة تشغيل البئر Regeneration مساوية لعملية إعادة تطهير البئر Redevelopment وقد يكون النفث المائى مفيدا للتخلص من الطبقات والقشور غير أنه يحتاج إلى تركيب ملائم لباشبورى الماء وسرعات نفث عالية (٣٠ م / ث).

ثالثا : إعادة التشغيل باستخدام الكيماويات

أ- هايبو كلوريتات Hypochlorites
يستخدم هيبوكلوريت الكالسيوم وهيبو كلوريت الصوديوم فى إعادة تشغيل الآبار خاصة عندما يحدث الإنسداد خارج المصافى بواسطة Iron Sulfides والنشاط الميكروبيولوجى. وعادة يستعمل محلول بتركيز ١٥ % كلورين (٢٥٠ كجم للمتر المكعب من المياه).

ب- كالجون Calgon
يطلق عادة على هيكساميتا فوسفات الصوديوم Sodium Hexameta Phosphate أسم كالجون ، وهى بوليفوسفات زجاجى Glass Polyphosphate ولها خواص مميزة ساعدت على انتشار استعمالها فى معالجة المياه ، وعلى سبيل المثال فهى تمنع ترسب كربونات الكالسيوم وتساعد على تكوين أغشية رقيقة من الفوسفات على الأسطح المعدنية لمقاومة التآكل. ومن أهم خواص الكالجون قدرتها الواضحة فى تشتيت الأجزاء المتفتتة من الأكاسيد المعدنية والأملاح بما فيها كربونات الكالسيوم والطين والمواد المتشابهة. ولذلك فإن الكالجون يمكن أن يستعمل لإعادة تشغيل وتطهير الآبار.

وحيث أن الكالجون مادة غير مسببة للتآكل Not Aggressive فإنه يمكن استعمالها بأمان لأى نوع من الآبار ، وهى موجودة فى حالة حبيبات مما يسهل تخزينها وتداولها.

وهى تستخدم عادة بنسبة من ١٥ إلى ٣٠ كجم لكل متر مكعب من المياه. وفى حالة إمكان إجراء عملية الكبس Surging فإن الكيماويات تترك فى البئر لمدة من ٢٤ إلى ٤٨ ساعة. أما إذا كان الكبس غير ممكن أو غير مرغوب فإنه يمكن الوصول إلى نفس النتيجة بدون كبس بالسماح لشحنة الكالجون بالبقاء داخل البئر لمدة أسبوع على الأقل.

ج- الأحماض Acids
الأحماض الأكثر استعمالا فى إعادة تشغيل الآبار هى حامض الهيدروكلوريك Hydrochloric acid (HCL)، حامض الكبريتيك Sulpheric acid (H_2SO_4) وحامض الأوكساليك Oxalic acid ($C_2O_4H_2$, $2H_2O$).

١٠-٧-٤-٤ تنفيذ إعادة التشغيل بالكيماويات

أ- طريقة إدخال الكيماويات
للحصول على تركيز ملائم للكيماويات يمكن إتباع إحدى طريقتين للخلط :
- يحضر أولا محلول بالتركيز المطلوب ثم يستبدل به الحجم الأصلى للبئر (أو جزء من البئر).
- يحضر محلول ذو تركيز عالى ثم يخلط بالماء فى البئر أو فى جزء من البئر.

- والمحاليل التى سوف يتم تحضيرها بالتركيز المطلوب عادة تكون متواجدة فى صورة سائلة مثل حامض الهيدروكلوريك وهايبوكلوريت الصوديوم. أما الكيماويات المتوافرة فى صورة صلبة فإنه يمكن معها تحضير محاليل ذات تركيز عالى ثم صبها فى البئر حيث تختلط بالمياه داخله.

ب- الرج والتقليب

من الضرورى أن يتم التفاعل بين الكيماويات المضافة وبين الطبقات المترسبة أو المواد المسببة للانسداد، لذلك فإنه يجب توصيل محاليل العلاج إلى تلك المناطق المسدودة مع رج وتقليب المياه داخل البئر لزيادة كفاءة عملية إعادة تشغيل البئر. ويتوقف مدى تكثيف الرج والتقليب على نوع الانسداد ومكانه والكيماويات المستعملة.

وعلى سبيل المثال إذا كان الانسداد قد حدث خارج المصافى بالغلاف الزلطى أو فى التكوين الجيولوجى ففى هذه الحالة يكون من الضرورى عمل كبس Surging لدفع المحاليل الكيماوية من المصافى إلى الأماكن المسدودة ، أما إذا كان هناك مجرد ترسيبات طبقية على مصافى البئر فإن عمليات الكبس قد تسبب فقدان كميات من المحاليل الكيماوية خلال المناطق المسامية خارج المصافى والغلاف الزلطى. وفى هذه الحالات يكون من الأنسب ترك المحلول بالبئر فى حالة سكون. وكقاعدة فإنه عندما يتم التعامل بمادة الكالجون أو حامض الأوكساليك أو الكوبوريت Coporite فإن المحلول يجب أن يبقى دون تقليب أو رج لمدة ١٢ - ٢٤ ساعة .

وبعد إعادة تركيب المضخة فإنه يمكن إجراء عملية الكبس بفتح المضخة وغلقها Switch on and off وبدون تصرف الماء. وهذه الطريقة تكون فاعلة إذا كان هناك فقط قشور Incrustants على المصافى مع استعمال أحد العناصر المؤكسدة القوية (مثل حامض الهيدروكلوريك). وعلى وجه العموم إذا كان الانسداد خارج المصافى فإنه يجب دفع المحلول من داخل البئر إلى الغلاف الزلطى والتكوين الجيولوجى حيث تتم عملية الكبس Surging بواسطة هواء مضغوط أو غسيل عكسى Back washing .

ج- إختبار ضخ البئر

بعد إتمام معالجة البئر فإنه عادة يتم إجراء تجربة ضخ خطوة الهبوط Step-Drawdown Pumping Test لمعرفة حالة البئر الجديدة ومقدار إنتاجيته. ويجب مراعاة أن التصرفات الأولى للبئر بعد إعادة تشغيله قد تكون ملوثة بشدة بواسطة الكيماويات وبقايا عمليات التنظيف حيث يلزم أخذ الاحتياطات الضرورية لحماية المناطق المتاخمة للبئر. وفى أى الحالات فإنه يجب غلق الوصلة المؤدية إلى أنبوب النقل أو شبكة التوزيع. وتجميع عينات من المياه خلال فترات الضخ الأولى يساعد على توقع ما حدث فى الانسداد وتأثير محلول العلاج حيث يكون اللون ومقدار الرمل العالق والرائحة والشوائب مؤشرات على ذلك.

وقد تستدعى حالة البئر إجراء عملية تعقيم Desinfection (مثل حالة التآكل البكتريولوجى) وفى هذه الحالة فإنه تتم عملية التعقيم باستعمال الكوبوريت Coporite قبل إعادة استعمال البئر ويجب أن يتم ذلك بحيث يوضع فى البئر محلول بتركيز ٢٠٠ مجم من الكلورين النشيط Active Chlorine ويترك لعدة ساعات. وقبل ضخ الماء إلى شبكة التوزيع أو خط الأنابيب فإنه يجب التخلص من المياه الأولى فى المصرف.

١٠-٨ إختبارات الضخ من الآبار

١٠-٨-١ مقدمة

تعتبر إختبارات الضخ من الآبار من الخطوات الأساسية التى يلزم إجراؤها بعد الانتهاء من تطهير أى بئر جديد ، وتعطى هذه الإختبارات معلومات رئيسية لبيان مدى إنتاجية البئر والهبوط فى منسوب المياه الجوفية المصاحب للضخ ، كما تسمح هذه الإختبارات بتحديد الخواص الهيدروليكية للطبقات الحاملة للمياه.

١٠-٨-١-١ الغرض من إختبارات الضخ

يتم عمل إختبار للبئر لأى من الغرضين الأساسيين التاليين: الأول تحديد المعاملات الهيدروليكية للطبقة الحاملة للمياه والتى تم دق البئر فيها وفى هذه الحالة يسمى الإختبار بإختبار الطبقة الحاملة. والغرض الثانى هو الحصول على البيانات الخاصة بالتصرف النوعى Specific Capacity والهبوط المتوقع فى منسوب الماء فى البئر والعلاقة بينهما وهذه البيانات يمكن الاستفادة منها لتحديد التصرف النوعى الذى يساعد على إختيار نوع المضخة وتحديد تكلفة الضخ. ويعبر التصرف النوعى عن مدى كفاءة البئر فى الحصول على تصرف معين أكثر مما يعبر عن خواص الطبقة الحاملة للمياه. وعند إختبار الطبقة الحاملة للمياه يتم رصد تأثير السحب من البئر على مناسيب المياه بالمنطقة المحيطة بالبئر وفى البئر نفسه وذلك بواسطة مجموعة من البيزومترات ويتم تحديد المعاملات الهيدروليكية للطبقة الحاملة باستخدام المعادلات التى تربط الهبوط فى البيزومتر كدالة فى البعد عن البئر الذى تم سحب التصرف منه. وفى الإختبار الذى يحقق الغرض الثانى يتم رصد التصرف والهبوط فى منسوب المياه داخل البئر فقط نظرا للتكلفة العالية لعمل الإختبارات للطبقات الحاملة ويجرى استخدام هذه البيانات للتحقق من مدى كفاءة البئر لإنتاج المياه.

١٠-٨-١-٢ التتابع الطبقى والبيانات الهيدروجيولوجية

يلزم معرفة البيانات الأساسية عن التركيبات الجيولوجية والصفات الهيدروليكية للموقع بجمعها من المصادر المختلفة قبل البدء فى عمل الإختبار. وكذلك الخصائص الجيولوجية للطبقة الحاملة للمياه بما فيها القطاع وتتابع الطبقات وسمك كل منها وسمك الطبقة الحاملة للمياه وكذلك نوعية التكوينات المحيطة بهذه الطبقة أى معرفة نوع الطبقات التى تحد الطبقة الحاملة للمياه من أعلى ومن أسفل. وأغلب المعادلات المستخدمة فى تحليل نتائج الإختبار تعتمد على بعض الفروض أهمها أن هذه الطبقة الحاملة ممتدة بدرجة كبيرة فى الاتجاه الأفقى وهذا نادرا ما يتحقق لأن أغلب الطبقات الحاملة للمياه محدودة المساحة حيث تخترقها فى بعض الأماكن بعض الطبقات الكتيمة مثل وجود القاع الصخرى للوديان أو وجود فوالق أو وجود تغيرات عرضية فى القطاع الجيولوجى لهذه الطبقة الحاملة. كما يجب تحديد أماكن التغذية بالمياه والتى لا يحدث عندها أى هبوط مثل التقاء الطبقة الحاملة للمياه بنهر أو ترعة أو بحيرة مع وجود استمرارية هيدروليكية مع هذه الطبقة. ولذلك عند عمل إختبار لطبقة حاملة للمياه مجاورة لمثل هذه الأماكن فإن هذه الظروف يجب أن تؤخذ فى الاعتبار عند عمل تحليل لنتائج الإختبار. كما يلزم تحديد أماكن وطبيعة الحدود الهيدروليكية ومعرفة اتجاه سريان الماء الجوفى وكذلك الانحدار الهيدروليكى العام فى المنطقة.

ومن الضرورى إعداد وصف كامل ودقيق لتتابع الطبقات فى موقع البئر ، فعند حفر أى بئر فإنه يلزم الحصول على عينات للتكوينات الجيولوجية المختلفة والتى تم اختراقها وعمل الوصف والقطاع الليثولوجى لها مع ضرورة إعطاء عناية أكبر للتدرج الحبيبى لها والمواد المختلفة فعلى هذا الأساس سيتم تحديد طول المصافى فى البئر وكذلك مكانها وعلى العموم تكون المصفاة مقابلة للطبقة الحاملة للمياه وذات أكبر حجم للحبيبات على طول القطاع.

١٠-٨-١-٣ الاستعدادات والتركيبات الخاصة بالبئر

أ- إختيار موقع الإختبار

عند إجراء دراسة تفصيلية لخزان جوفى فإنه يلزم أولا تحديد موقع عمل الإختبار. ولكن فى بعض الأحيان يكون موقع الإختبار محددا مسبقا وليس فى الإمكان تغييره خاصة فى حالة وجود آبار منفذة فعلا ويمكن استخدامها فى عمل الإختبار أو فى حالة ضرورة تحديد المعاملات فى موقع محدد. ولكن فى حالة الخزانات الجوفية الكبرى فإنه يمكن أن تكون هنالك حرية فى إختيار موقع أو أكثر للإختبار. وعند تحديد موقع الإختبار فإنه يلزم أن تراعى الاعتبارات التالية :

- الظروف الهيدروليكية فى الموقع وعدم تغيرها على مسافات متقاربة وأنها تمثل مساحات كبيرة من المنطقة تحت الدراسة.
- بعد المكان الذى يتم إختياره عن السكك الحديدية أو الطرق الرئيسية حيث إمكانية حدوث تغيرات عند المرور الكثيف وحدوث تذبذب فى القراءات وخاصة بالنسبة للطبقات المحصورة.
- المياه التى يتم ضخها يجب أن تصرف بطريقة لا تسمح بعودتها مرة أخرى للبئر تحت الإختبار.
- الانحدار الهيدروليكى لسطح المياه فى الطبقة الحاملة للمياه يجب أن يكون قليلا.
- سهولة الوصول إلى الموقع وذلك بالنسبة للعمالة أو المعدات المستخدمة فى الإختبار.

ب- بئر السحب

بعد إختيار موقع الإختبار يمكن حفر بئر السحب ويزود البئر بمضخة سحب لرفع المياه حتى سطح الأرض حيث تصرف وتعتبر التسمية (بئر السحب) أو (بئر الضخ) هى نفس التسمية لبئر الإختبار ويمكن الرجوع إلى تصميم وتنفيذ البئر فى البنود (١٠-٣)،(١٠-٤).

ج- إختبار المضخة

عند استكمال بئر السحب فإنه يجب تركيب المضخة ، ويراعى أن تكفى للعمل بصفة مستمرة لمدة لا تقل عن يومين على الأقل. وعند إختبار الطبقات المحصورة أو شبه المحصورة فإن فترة السحب من البئر تكون أقل من ذلك. أما فى حالة ما إذا كان بئر الملاحظة على مسافة كبيرة من بئر السحب فإنه يجب أن يستمر السحب لفترات طويلة حتى يمكن الوصول إلى قراءات مناسبة للتحقق من النتائج وأن تكون المضخة من القوة بحيث يمكن معهـــا حدوث هبوط فى سطـــح المياه فى البيزومترات عــــلى مسافـــات من ١٠٠ الى ٢٠٠ متر من البئر وذلك حسب ظروف الطبقة الحاملة للمياه. وبعد تركيب المضخة فإنه يجب أن يتم تشغيلها تحت تصرف محدد لفترة إلى أن تصبح المياه رائقة بدون مواد عالقة حيث يمكن زيادة السحب حتى الوصول إلى التصرف المطلوب أو زيادته عن هذه القيمة إلى الحد المطلوب الوصول إليه. وعند إتمام تركيب آبار الملاحظة حول البئر والوصول إلى التصرف المطلوب فإن ذلك سوف يحقق إمكانية التأكد من سلامة كافة آبار الملاحظة وهل تؤدى عملها بدرجة مقبولة أم لا.

د- صرف المياه المسحوبة من البئر

يجب عمل اللازم حتى لا تعود المياه التى يتم رفعها من البئر إلى الموقع مرة ثانية ومنها إلى الطبقة الحاملة للمياه وذلك باستخدام ماسورة ذات قطر كاف لنقل هذه المياه إلى مسافة من ١٠٠ إلى ٢٠٠ متر من البئر أو إلقاؤها فى ترعة أو مصرف غير متصل بالطبقة الحاملة للمياه تحت الإختبار. ويفضل أن يتم صرف هذه المياه فى اتجاه بعيدا عن آبار الملاحظة (البيزومترات) وفى حالة استخدام مجارى مائية مكشوفة لصرف المياه فإنه يفضل استخدام أى من الوسائل الممكنة لقياس التصرف فى هذه المجارى لإمكان التحقق من عدم وجود تسرب من هذه المجارى خلال فترة الإختبار.

هـ- البيزومترات

الغرض الأساسى من إختبار الضخ للبئر هو دراسة تأثير هذا الضخ على مناسيب المياه الجوفية فى المنطقة المحيطة بالبئر ولذلك يتم تركيب عدد من البيزومترات فى المنطقة المجاورة للبئر.

عدد البيزومترات

لا يتوقف إختيار عدد البيزومترات على عدد المعاملات الهيدروليكية المطلوب تحديدها من الإختبار وعلى درجة الدقة المطلوبة فحسب ولكن على الإمكانيات المادية المتاحة لعمل الإختبار أيضا. وكما سيتضح فيما بعد فى هذا الفصل فإن البيانات التى يمكن الحصول عليها من تركيب بيزومتر واحد تكفى لتحديد معامل النفاذية ومعامل النقل ومعامل التخزين للطبقة الحاملة للمياه. ومن مميزات وجود بيزومترين أو أكثر يتم وضعها على مسافات مختلفة من بئر الإختبار أنه يمكن دراسة التغير فى الهبوط مع الوقت وكذلك التغير فى الهبوط مع المسافة. وبذلك تكون الدراسة أكثر دقة والنتائج ممثلة لمساحة أكبر من الطبقة الحاملة للمياه.

مواقع البيزومترات

عند تحديد مواقع البيزومترات بالنسبة لبئر السحب فإنه يلزم أن تراعى الاعتبارات التالية :

نوع الطبقة الحاملة للمياه

فى الطبقات المحصورة يكون تغير الفاقد فى الضاغط الناتج عن سحب المياه من البئر سريعا نظرا لأن سريان الماء يكون ناتجا عن الإنضغاط فى المياه والطبقة ولذلك يكون هذا الفاقد قابلا للقياس حتى على مسافات كبيرة من البئر. أما فى حالة الطبقات غير المحصورة فإن التغير فى منسوب سطح المياه بها نتيجة السحب من الآبار يكون بطيئا لأن خروج المياه منها فى هذه الحالة نتيجة تخفيض سطح المياه ينتج من حركة المياه الفعلية وجزئيا من الإنضغاط فى المياه والطبقات الحاملة للمياه وذلك ما لم تزد مدة الضخ عن عدة أيام. ويكون القياس للتغير الناتج فى سطح المياه محدودا فى المسافة القريبة من البئر التى غالبا ما تكون أقل من مائة متر. أما فى الطبقات شبه المحصورة فإنها تكون ما بين الحالتين السابق ذكرهما حيث أنها تعتمد على المقاومة الهيدروليكية لهذه الطبقة وكذلك قرب صفاتها إلى الحالة الأولى أو الحالة الثانية.

القدرة الهيدروليكية على التوصيل

يجب ملاحظة أنه فى حالة القدرة الهيدروليكية العالية للطبقة فإن مخروط السحب يكون مفلطحا عريضا وعميقا فى نفس الوقت وفى حالة صغر هذه الخاصية فإنه يكون حادا فى ميوله ومحدود الامتداد. ولذلك ففى الحالة الأولى يجب أن تكون البيزومترات على مسافة بعيدة عن البئر مقارنة بالحالة الثانية.

كمية التصرف التى يتم سحبها من بئر الإختبار

فى حالة كبر كميات المياه التى يتم سحبها من البئر فإن مخروط السحب الناتج من ذلك يكون أكبر منه فى حالة السحب القليل ولذلك يمكن فى الحالة الأولى وضع البيزومترات على مسافة بعيدة عن البئر بينما يكون ذلك غير مناسب فى الحالة الثانية.

طول مصفاة البئر

إختيار المسافة بين البيزومترات وبعدها عن بئر السحب يعتمد بدرجة كبيرة على طول مصفاة البئر ذلك لإنه فى حالة الآبار كاملة الاختراق للطبقة الحاملة للمياه أو تصل نسبة اختراق ماسورة المصفاة إلى ٨٠% من سمك الطبقة الحاملة للمياه فإن السريان الواصل للبئر يكون فى الاتجاه الأفقى ولذلك فإنه يمكن الاعتماد على قياسات الهبوط التى تحدث حتى ولو كان البيزومتر على مسافة قريبة من البئر. أما فى

حالة الطبقات ذات السـمك الكبير والتى لا يمكن عمل اختراق كامل لها يكون الاختراق جزئيا لهذه الطبقة ويكون السريان للمصفاة غير أفقى خاصة فى المناطق المجاورة للبئر ويؤدى استخدام القراءات للبيزومترات المجاورة للبئر وعلى مسافة صغيرة منه فى هذه الحالة إلى نتائج غير سليمة. ويمكن التغلب على هذه المشكلة بوضع البيزومترات على مسافة بعيدة من البئر حيث يتلاشى ذلك التأثير. وعموما فإنه يجب أن يوضع أقرب بيزومتر على مسافة تعادل على الأقل سمك الطبقة الحاملة للمياه حيث يمكن فى هذه الحالة افتراض أن السريان أفقيا.

وجود طبقات فى التكوين الجيولوجي

الطبقة المتجانسة الحاملة للمياه نادرة الوجود فى الطبيعة وغالبية التكوينات الجيولوجية تكون من طبقات بدرجة أو بأخرى. ولذلك يكون الهبوط الذى يمكن قياسه على مسافة محددة مختلفا من عمق لأخر من نفس الطبقة الحاملة للمياه وكذلك قيمة التغير فى درجة النقل الهيدروليكى لكل جزء من الطبقة الحاملة للمياه بجانب اختلاف هذه القدرة فى الاتجاه الأفقى عنها فى الاتجاه الرأسى ويقل هذا الاختلاف بدرجة كبيرة مع زيادة زمن السحب من البئر كما يقل هذا الاختلاف مع زيادة بعد البيزومترات عن بئر السحب.

ومن الاعتبارات السابق ذكرها يتضح أن عددا كبيرا من العوامل تؤثر على تحديد المسافة بين البيزومترات وبئر السحب ولذلك يجب معرفة ظروف المنطقة ونوع الطبقة وسمكها ومعامل التوصيل الهيدروليكى التقريبى لها ووجود طبقات بها من عدمه لأن ذلك يساعد فى البداية على تحديد الأماكن المثلى لتوزيع البيزومترات وبعدها عن بئر السحب. ونظرا لأنه لا توجد قاعدة عامة لهذه المسافات فإنه يفضل أن يتم توزيع البيزومترات على مسافة من ١٠ - ١٠٠ متر وتكون النتائج التى يمكن الحصول عليها مناسبة وجيدة. ولكن يجب زيادة هذه المسافات إلى ١٠٠ - ٢٥٠ مترا فى حالة الطبقات الحاملة للمياه ذات العمق الكبير أو وجود طبقات بها. كما أنه يفضل أن يتم وضع أحد البيزومترات خارج نطاق مخروط السحب للبئر للتأكد من عدم تغير منسوب المياه الجوفية بالطبقة وقت السحب من البئر ولذلك يجب أن يكون موقعه على مسافة مئات الأمتار من البئر وفى بعض الأحيان على بعد كيلومتر من البئر. وفى حالة وجود تغير فى قراءة مثل هذا البئر أثناء السحب فإنه يجب أن يتم إجراء تصحيح فى القراءات التى تم الحصول عليها من البيزومترات أثناء السحب من البئر عند عمل التحليل.

عمق البيزومترات

يعتبر عمق البيزومترات على نفس الدرجة من الأهمية مثل بعدها عن بئر السحب ففى حالة الطبقات المتجانسة الحاملة للمياه فإنه يفضل أن تكون مناسيب البيزومترات على نفس منسوب منتصف المصفاة للبئر التى يتم السحب منها. ويجب أن يتم تجهيز البيزومترات بمصفاة أيضا ذات طول من نصف إلى واحد متر تقريبا . وفى حالة الطبقات غير المتجانسة والتى تتخللها طبقات طينية فإنه يفضل أن تكون مصفاة البيزومترات مخترقة الطبقة الطينية وذلك فى حالة وجود اتصال للطبقة الحاملة للمياه فوق وتحت الطبقة الطينية المخترقة لها. وعموما يجب أن تكون مصفاة البيزومترات على بعد عدة أمتار من الحدود العليا والسفلى للطبقة الكتيمة وحيث يكون التسرب من هذه الأماكن محدود الأثر.

وفى حالة إختبار طبقة حاملة للمياه تعلوها طبقة طينية يوجد بها منسوب ماء أرضى فإنه فى هذه الحالة يركب أحد البيزومترات فى الطبقة الحاملة للمياه وأخر فى الطبقة التى تعلوها حيث منسوب الماء الأرضى. وهذه البيزومترات العلوية لها فائدة فى تحديد تأثير السحب من الطبقة الحاملة للمياه على منسوب الماء بالطبقة التى تعلوها. ومثل هذه البيانات هامة فى الطبقات شبة المحصورة.

تركيب البيزومترات

فى حالة رصد بيانات سطح المياه فى البيزومترات بواسطة الطرق اليدوية فإن قطر البيزومتر يجب ألا يزيد عن ٥ سم ولكنه يكون أكبر من ذلك فى حالة تسجيل هذه القراءات أوتوماتيكيا. ويجب وضع مصفاة بطول من ٠,٥ إلى ١,٠ متر فى الطبقة المطلوب قياس منسوب المياه عندها ويجب أن يملأ الفراغ بين المصفاة والحفرة بواسطة رمل خشن منتظم لسهولة دخول المياه إلى المصفاة ويتم ملء باقى الفراغ بأى مادة أخرى متاحة ما عدا فى الأماكن التى توجد فيها طبقات طينية ويجب وضع مادة قاطعة (من الطين أو الخرسانة) لمنع أى تسرب حول الماسورة من أى من أحد أجزائها للأجزاء الأخرى.

أما فى حالة الطبقات غير المتجانسة الحاملة للمياه أو التى تخترقها بعض الطبقات الطينية فإنه يلزم حفر ثقوب ذات قطر أكبر حتى يمكن إدخال أكثر من ماسورة بيزومتر فى نفس الثقب وذلك للوصول إلى نتائج عن ضغوط المياه على أعماق مختلفة. ولذلك يجب أن تعطى عناية تامة لغلق الطبقة الطينية التى تم اختراقها حتى يمنع التسرب من خلالها كما أنه ليس ضروريا معرفة منسوب سطح المياه بالبئر مقارنة بمنسوب سطح البحر ولكن جرى العرف أن يتم تسجيل كافة المناسيب مقارنة إلى منسوب مقارنة واحد بالموقع. وبعد تركيب البيزومترات فإنه يفضل أن يتم سحب المياه أو غسل كافة البيزومترات بالماء لفترة قصيرة وذلك لإزالة أى حبيبات من الطين قد تكون موجودة بها.

١٠-٨-١-٤ خطوات ومعدات وأرصاد الإختبارات

أ- رصد مناسيب سطح المياه

يجب أن يرصد منسوب سطح المياه فى البئر والبيزومترات لعدة أيام قبل إجراء تجارب الإختبار ويكون الرصد بمعدل مرتين فى اليوم. وترسم هيدروجرافات توضح المنسوب فى هذا الموقع وتغيره مع الوقت ويمكن استنتاج المدى المتوقع فى التغير فى منسوب سطح المياه فى هذا الموقع.

وفى حالة ما إذا كان هذا التوقع غير محتمل حدوثه فى خلال فترة الإختبار فإنه يمكن بدء السحب من بئر الإختبار. وعند نهاية الإختبار أى بعد الرجوع التام فى مناسيب المياه فإنه يجب استمرار أخذ القراءات فى البئر والبيزومترات وذلك لمدة يوم أو يومين بعد إنهاء الإختبار. ومن هذه القراءات يمكن تكملة الهيدروجرافات للموقع وتحديد التغير الكلى فى منسوب سطح المياه خلال فترة التجربة. كما تؤخذ فى الاعتبار المشاكل التى تحدث عند إجراء تجارب إختبار على آبار واقعة بجوار الشواطئ حيث يحدث تغير فى المناسيب فى الطبقات الحاملة للمياه تحت تأثير المد والجزر. لذلك يجب أن يتم رصد مدى التغير فى مناسيب المياه لكل بيزومتر محددا للمنسوب الأقصى والأدنى والتغير مع الزمن.

ويعتبر رصد مناسيب المياه فى البيزومترات وفى البئر نفسه إن أمكن من أهم البيانات التى يجب جمعها وتتم هذه العملية فى فترات مختلفة متعددة أثناء السحب من البئر. ولما كان هبوط سطح المياه سريعا خلال الساعة الأولى أو الساعتين الأوليتين من بداية التشغيل لذلك يجب أن تتم القراءات خلالها على فترات مختصرة وأن تزيد هذه الفترة كلما زاد زمن السحب من البئر ويعطى الجدول رقم (١٠-٤) مثالا استرشادياً للفترات التى يمكن عندها أخذ القراءات فى حالة عمل إختبار على بئر لفترة طويلة.

وبنفس الطريقة يمكن أخذ قراءات منسوب سطح المياه فى البيزومترات على فترات قصيرة فى الساعات الأولى من التشغيل وتزداد بالتدريج مع استمرار السحب والتشغيل.

والجدول رقم (١٠-٥) يعطى مثالا استرشاديا للفترات العملية لرصد مناسيب سطح المياه فى البيزومترات، والفترات الموضحة بهذا الجدول لحالة بيزومترات مركبة على مسافة مترين من البئر

حيث يلاحظ أن سطح المياه فى كل هذه الأماكن يتأثر مباشرة وفى نفس اللحظة بالسحب من البئر. أما فى حالة البيزومترات الواقعة على مسافة أكبر من بئر السحب وكذا البيزومترات المستخدمة لرصد منسوب سطح المياه فى الطبقات الحاملة للمياه الواقعة حول الطبقة التى يتم السحب منها فإن القراءات لهذه البيزومترات فى الدقائق الأولى من السحب ليست ذات أهمية.

والفترات المقترحة بهذه الجداول لا تعتبر إلزامية فى جميع الحالات لكن ظروف الموقع وخبرة العاملين فى الإختبار هى التى تحدد الفترات المناسبة لإجراء الرصد.

وحيث أن الرصد يجب أن يكون بصفة شبة دورية فى الساعات الأولى من التشغيل فإن أحسن الطرق لقياس سطح المياه هى الطريقة الأوتوماتيكية فى الرصد والتسجيل لهذه المناسيب مع الوقت وفى هذه الحالة يلزم أن تكون ماسورة البيزومترات ذات قطر كاف لإمكان تركيب هذه المعدات.

ويعتبر تسجيل مناسيب المياه يدويا على درجة مناسبة من الدقة كما يمكن قياس عمق المياه لدرجة دقة تعادل ملليمتر أو ملليمترين وذلك باستخدام المقياس الصلب ذى العوامة العادية مع المؤشر أو جهاز الجس الكهربائى أو استخدام الشريط المبتل أو إلكترونيا.

أما البيزومترات المجاورة لبئر السحب فإن استخدام الشريط الصلب ذى المؤشر يمثل العنصر الهام للوصول إلى تسجيل سطح المياه مع الوقت بطريقة دقيقة وسليمة يمكن معها التعامل مع التغير السريع فى منسوب المياه فى هذه المناطق وخاصة فى الساعات الأولى من التشغيل ويكون استخدام التسجيل الأوتوماتيكى للمناسيب من البيزومترات مناسبا بعيدا عن البئر لأن التغير فى مناسيب سطح المياه يحدث ببطء.

أما فى حالة البيزومترات على مسافات متوسطة من الآبار فإن إختيار نظام العوامات أو الرصد اليدوى لمنسوب سطح المياه يعتبر مناسبا إلا أنه يمكن الحصول على درجة أعلى من الدقة باستخدام المسجلات حتى فى حالة التغير السريع فى منسوب سطح المياه وبعد الانتهاء من تجربة السحب من البئر فإن مناسيب المياه تبدأ فى الارتفاع فى البئر وفى البيزومترات ويكون الارتفاع سريعا فى الساعات الأولى بعد إيقاف السحب وتتناقص هذه السرعة مع زيادة المدة الزمنية من لحظة إيقاف السحب. ويمكن تسجيل هذه البيانات وتعتبر ممثلة لتجربة إختبار الإسترجاع Recovery test ويمكن الإستفادة من نتائج إختبار الاسترجاع للتأكد من النتائج التى تم الحصول عليها من قراءات السحب العادي. وبرنامج التسجيل لنتائج إختبار الاسترجاع مماثل لنفس البرنامج المستخدم فى تسجيل قراءات السحب العادى من البئر.

ويلاحظ أنه فى حالات الآبار ذات الأعماق الكبيرة أو التى تخترق طبقات ذات نفاذية ضعيفة توجد صعوبة فى الحصول على بيانات فى الفترة الأولى من تجربة إختبار الاسترجاع وخاصة فى موقع البئر نفسه أو البيزومترات الواقعة على مسافات قريبة من البئر.

ويجب أن يتم تسجيل مناسيب سطح المياه فى جداول معدة مسبقا ذات شكل ثابت {على سبيل المثال الموضح بالشكلين (١٠-٢٦) ، (١٠-٢٧)} . وبعد مرور فترة كافية من السحب يمكن عمل منحنيات للتغير فى منسوب المياه مع الوقت لكل بيزومتر والذى يجب أن يرسم على ورق نصف لوغاريتمى (حيث الوقت بالدقائق على محور لوغاريتمى والهبوط فى سطح المياه بالسنتيمتر أو بالملليمتر على محور عادى) وباستخدام هذه المنحنيات يمكن التأكد من أن التجربة تسير بطريقة سليمة أو إنه يجب وقف السحب لوجود عيب أو خطأ فى التجربة.

جدول رقم (١٠-٤) مثال للفترات الزمنية التقريبية بين القياسات لمنسوب سطح المياه فى بئر الإختبار

الوقت من بدء السحب من البئر	الفترة الزمنية بين القياسات
صفر - ٥ دقائق	نصف دقيقة
٥ ـ ٦٠ دقائق	٥ دقائق
٦٠ ـ ١٢٠ دقيقة	٢٠ دقيقة
١٢٠ - انتهاء السحب من البئر	٦٠ دقيقة

جدول رقم (١٠-٥) مثال للفترات الزمنية التقريبية بين القياسات لمنسوب سطح المياه فى البيزومترات

الوقت من بدء السحب من البئر	الفترة الزمنية بين القياسات
صفر - ٢ دقيقة	حوالى كل ١٠ ثوان
٣ - ٥ دقائق	٣٠ ثانية
٥ - ١٥ دقيقة	١ دقيقة
١٥ - ٥٠ دقيقة	٥ دقائق
٥٠ - ١٠٠ دقيقة	١٠ دقائق
١٠٠ دقيقة - حتى ٥ ساعات	٣٠ دقيقة
٥ ساعات - ٤٨ ساعة	٦٠ دقيقة
٤٨ ساعة - ٦ يوم	٢ مرات فى اليوم
٦ يوم - حتى تمام انتهاء السحب	مرة واحدة فى اليوم

PUMP TEST DATA SHEET PUMPING PHASE

WELL : LOCATION : PROJECT :

DATE : OBSERVER :

INITIAL READINGS

TIME				
WATER LEVEL M-GL				
EC US/CM				
WATER METER M^3				

START TEST

TIME	TIME AFTER START TEST min	WATER LEVEL m	DRAWDOWN m	WATER METER READING m^3	DISCHARGE m^3/hr	REMARKS
	0.3					
	0.5					
	1.0					
	1.5					
	2.0					
	3.0					
	5.0					
	7.0					
	10					
	13					
	16					
	20					
	25					
	30					
	40					
	50					
	60					
	75					
	90					
	120					
	150					
	180					
	240					
	300					
	360					
	480					
	500					
	720					

شكل (١٠-٢٦) نموذج بطاقة تسجيل بيانات (إختبار الضخ)

PUMPING TEST DATA SHEET RECOVERY PHASE

WELL : LOCATION : PROJECT :

DATE : OBSERVER :

STATIC WATER LEVEL :		M-G.L.
START PUMPING :		HR
START RECOVERY :		HR
DURATION PUMPING :		MIN
AVERAGE DISCHARGE :		M^3/HR

TIME	TIME SINCE START PUMPING t (min)	TIME AFTER START TEST t// (min)	WATER LEVEL m	RESIDUAL DURATION m	t / t//	REMARKS
		0.3				
		0.5				
		1.0				
		1.5				
		2.0				
		3.0				
		5.0				
		7.0				
		10				
		13				
		16				
		20				
		25				
		30				
		40				
		50				
		60				
		75				
		90				
		100				
		150				
		180				
		240				
		300				
		360				
		480				
		500				
		720				

شكل (١٠-٢٧) نموذج بطاقة تسجيل بيانات (إختبار استرجاع)

ب- قياس التصرفات

يجب أن تشتمل إختبارات الضخ على قياس التصرفات المسحوبة من البئر. ومن المفضل تثبيت تصرف المضخة طوال التجربة غير أنه ليس ضروريا أن يكون التصرف ثابتا طوال تجربة الإختبار حيث توجد طرق للأخذ فى الاعتبار حالات التغير فى التصرف من البئر سواء كان ذلك ناتجا عن أسباب طبيعية أثناء التجربة أو لظروف التجربة وإتمامها تحت السحب المتغير.

ويجب قياس التصرف على مدار الإختبار وبالدقة المطلوبة وتسجيلها بصفة دورية باستخدام أجهزة تسجيل التصرفات بالعدادات ذات القدرة المناسبة حيث يجب توصيل العداد وتركيبه على ماسورة الطرد من البئر وبالطريقة التى تسمح بقياس التصرف المار بالماسورة بدقة. أما فى حالة صرف المياه من البئر عن طريق مجرى أرضى صغير مكشوف فإنه يمكن قياس التصرف باستخدام مسيل بارشال Parshal Flume ويجب أن يتم قياس التصرف مرة كل ساعة على الأقل مع ضرورة الضبط من وقت لأخر للوصول إلى تصرف ثابت من البئر ويمكن استخدام محبس مركب على ماسورة الطرد ولا يتم عن طريق تغير سرعة دوران محرك الطلمبة المركبة على البئر نظرا لأن المحبس يعطى دقة أعلى فى التصرف عن أى طريقة أخرى.

وفى حالة عدم وجود عداد لقياس التصرف أو Parshal Flume فإنه يمكن استخدام إحدى الطرق الأخرى لقياس التصرفات مثل الخزانات ذات السعة المعلومة ومقياس الفتحة المستديرة Orifice meter وغيرها.

١٠-٨-١-٥ تحليل الأرصاد والقراءات Analysis of Records

بعد الانتهاء من إجراء الإختبار واستكمال كافة المعلومات والبيانات الخاصة بالتصرفات من البئر والهبوط فى البيزومترات المختلفة المحيطة بالبئر والتغير فى منسوب سطح المياه فى البئر وكذلك الانحدار العام لمسار المياه الجوفية يجرى تحليل لهذه البيانات والذى يجب أن يشمل الآتى :

- وضع البيانات التى تم الحصول عليها فى صورة منحنيات.
- عمل التصحيح اللازم فى بيانات التغير فى سطح المياه الناتج عن التغير العام فى هذا المنسوب للمنطقة ككل والتغير الناتج عن السحب من البئر.
- تحديد شكل ونوع الطبقة الحاملة للمياه والتى تم عمل إختبار السحب من الآبار عليها.

وتحتوى البيانات التى يتم جمعها من القراءات فى الطبيعة على أرصاد خاصة بالوقت موضحة بوحدات مختلفة (بالثوانى فى الدقائق الأولى من تجربة السحب وبالدقائق فى الفترة التالية من السحب ثم بالساعات بعد ذلك). لذا يجب أن يتم تحويل كافة البيانات إلى نوع واحد من وحدات قياس الوقت - بالدقائق على سبيل المثال. وأيضا بالنسبة لمنسوب سطح المياه الذى تم رصده يجب أن يوضع فى صورة هبوط فى سطح المياه بوحدات ثابتة غالبا بالمتر.

ويجب وضع هذه البيانات فى مجموعة جديدة من بطاقات بيانات تجربة الضخ (الشكل رقم ١٠-٢٦). وكذلك كافة البيانات الإضافية المطلوبة. أما الهبوط الذى يحدث فى كل من بيزومترات الملاحظة فيجب أن يتم توقيعه فى صورة منحنى يبين العلاقة بين الهبوط والزمن على ورق بيانى نصف لوغاريتمي. وأيضا على أوراق بيانية من النوع اللوغاريتمى فى الاتجاهين الأفقى والرأسى (أى الوقت والهبوط فى صورة لوغاريتمية).

ثم يلى ذلك تحليل للتغير فى منسوب المياه العام بالمنطقة خلال فترة إجراء التجربة والناتج عن حركة الماء الأرضى بالمنطقة. ولا يدخل فى هذا التغير ما يحدث من إجراء تجربة الإختبار. ولهذا الغرض يلزم

أن يكون معلوما ومرصودا منسوب سطح الماء لكل بيزومتر ولفترة تمتد لعدة أيام قبل إجراء التجربة وكذلك يوم أو يومين بعد إتمام الاسترجاع التام لمناسيب المياه بعد الإختبار. ويتم توقيعها مع الوقت على رسم بيانى عادى (ليس لوغاريتميا).

وبذلك يكون لكل بيزومتر منحنى التغير لمنسوب سطح المياه مع الوقت (الهيدروجراف) ومنه يمكن تحديد الاتجاه العام لسطح المياه ومدى التغير الذى حدث فيه وذلك بعد رسم العلاقة بين المنسوب والوقت على ورق رسم بيانى عادى. ومن هذا الهيدروجراف يمكن تحديد أى تغيير توقع حدوثه أثناء التجربة ومعدل التغير فى منسوب سطح المياه حتى يمكن عمل التصحيح اللازم فى القراءات التى تم الحصول عليها عند إجراء التجارب. حيث أن إهمال عمل هذا التغير عند إجراء تحليل البيانات يؤدى إلى نتائج خاطئة كلية لتجربة السحب من البئر.

ويمكن تحديد نوع الطبقة الحاملة للمياه بدراسة هذه المنحنيات الخاصة بالبيزومترات أو البئر نفسه ومقارنتها بما هو موضح بالشكل رقم (١٠-٨) ويمكن أن يعطى منحنى الوقت والهبوط فى سطح المياه فى البيزومترات القريبة من السطح فى الطبقة العليا وكذلك فى البيزومترات العميقة تحت الطبقة الحاملة معلومات إضافية عن نوع الطبقة الحاملة للمياه الأصلية. ففى حالة عدم وجود أى تغير فى مناسيب المياه فى الطبقة السفلى الحاملة للمياه والتى يتم سحب المياه منها فإنه يمكن اعتبار هذه الطبقة السفلى كتيمة. أما فى حالة حدوث تغير فى مناسيب المياه فى الطبقة الحاملة العميقة أثناء السحب من الطبقة الحاملة للمياه ولكن بدرجة أقل مما هو ملاحظ فى الطبقة الحاملة للمياه تحت الإختبار فإنه يجب أن تعامل على أنها منفذة للمياه وبذلك تمثل الحالة على أنها لطبقتين حاملتين للمياه.

أما فى حالة وجود طبقة سفلى كتيمة فإن رصد الهبوط فى سطح المياه فى البيزومترات القريبة من السطح يمكن أن يساعد فى تحديد نوع الطبقة الحاملة للمياه كما هو موضح بالجدول (١٠-٦).

جدول (١٠-٦) التعرف على نوع الطبقة الحاملة للمياه من درجة الهبوط فى الطبقة التى تعلوها

الهبوط فى الطبقة العليا فوق الطبقة الحاملة للمياه	نوع الطبقة الحاملة للمياه
لا يوجد	محصورة أو نصف محصورة
بسيط	نصف محصورة
ملحوظ	نصف محصورة
مساوى لما هو موجود فى الطبقة تحت الإختبار	غير محصورة

ويحدد شكل منحنى التغير فى الهبوط مع الوقت نوع الطبقة الحاملة للمياه. وعند نهاية تجربة إختبار البئر يجب أن تحدد ظروف السريان حتى يمكن إختيار الطريقة الملائمة لتقييم تجربة الإختبار. حيث أنه توجد طرق للحل مستنبطة على أساس الوصول إلى حالة السريان المستقر وطرق أخرى للحل فى حالة عدم الوصول إلى السريان المستقر أى السريان غير المستقر. وهذا السؤال يجب أن يحدد عند نهاية فترة الإختبار ويمكن إجابته بسهولة بواسطة استخدام منحنيات العلاقة بين الوقت والهبوط فى سطح المياه. ولذلك فإن هذه المنحنيات تأخذ الطابع ذا الانحدار البسيط مع زيادة فترة الإختبار حيث يلاحظ فى حالة زيادة فترة الإختبار لمدد طويلة أن تأخذ هذه المنحنيات شكل الخطوط المتوازية مع محور الزمن وهذا يعنى أن خط الانحدار الهيدروليكى صار ثابتا أى أن سريان الماء الأرضى فى الطبقة الحاملة للمياه أصبح فى صورة مستقرة. أما فى حالة ما إذا كانت فترة السحب للإختبار صغيرة نسبيا فإنه عادة ما يكون

الهبوط فى سطح المياه غير مستقر وكذلك عند إيقاف السحب من البئر يكون خط الانحدار الهيدروليكى والسريان فى الطبقة الحاملة للمياه غير مستقر. وهناك معادلات عديدة لحساب المعاملات الهيدروليكية والسريان للطبقات الحاملة للمياه وقبل استخدام أى من هذه الطرق يجب توخى الحذر فى الافتراضات التى بنيت على أساسها هذه المعادلات. وفى أغلب الأحوال تكون الظروف فى الطبيعة مختلفة إلى حد ما عن هذه الافتراضات النظرية. وهذه الاختلافات يجب أن تؤخذ فى الاعتبار عند الوصول إلى التقييم النهائى لنتائج الإختبار ويمكن القول بأن هذه الافتراضات قد تحد من تطبيق هذه المعادلات إذ أن بعضها لا توجد فى الظروف الطبيعية. إلا أن هذه المعادلات تستخدم بنجاح للحصول على الخصائص الهيدروليكية للطبقات الحاملة للمياه. وهى تعتبر مقبولة ويمكن الاعتماد عليها فى أغلب الأحيان.

أحد هذه الافتراضات هو أن الطبقة الحاملة للمياه متجانسة Homogeneous ومعاملاتها الهيدروليكية متساوية فى الاتجاهين Isotropic . ومن الصعوبة أن توجد فى الطبيعة مثل هذه الحالات حيث أن الطبقات الحاملة للمياه تحتوى على تكوينات مختلفة مما يجعل خواصها الهيدروليكية مختلفة بالنسبة للمكان والاتجاه.

١٠-٨-١-٦ تبويب وحفظ البيانات

بعد أن يتم تقييم نتائج الإختبار يجب عمل تقرير عن هذه النتائج يشتمل على العناصر التالية :

- خريطة تبين موقع بئر الإختبار ومواقع البيزومترات وكذلك مواقع التغذية للطبقة أو وجود حدود كتيمة بالموقع ..... الخ.
- قطاع فى التربة على امتداد عمق البئر فى الموقع وكذلك من واقع البيانات التى تم الحصول عليها من أى حفر إختبار تم عملها بالموقع مع تحديد العمق وطول المصفاة للبئر ٠
- الجداول الخاصة بالقياسات والأرصاد فى الموقع شاملة البيانات التى تم جمعها عن البئر من حيث التصرفات ومناسيب سطح المياه وكذلك بيانات البيزومترات المختلفة.
- هيدروجرافات مع توضيح التصحيحات التى تم عملها على البيانات التى تم قياسها فى حالة حدوثها.
- العلاقة بين الزمن وهبوط سطح المياه وكذلك العلاقة بين المسافة وهبوط سطح المياه وذلك فى صورة منحنيات.
- الاعتبارات التى تم اتخاذها والتى أدت إلى إختيار طريقة معينة للتحليل.
- الحسابات فى صورة مختصرة شاملة قيم المعاملات الهيدروليكية للطبقة الحاملة للمياه التى تم الحصول عليها وبعض المناقشات وتقدير درجة الدقة فى هذه البيانات.
- بعض التوصيات المطلوبة فى حالة أجراء أبحاث إضافية إن وجدت.
- ملخص للبيانات الرئيسية التى تم الحصول عليها.

ويجب أن تكون هناك نسخة تفصيلية من التقرير موضوعة فى ملف للاستفادة بها فى الدراسات المستقبلية. وكذلك يجب حفظ عينات من الطبقات المختلفة التى تم اختراقها أثناء الحفر وذلك للاستفادة منها مستقبلا فى حالة إجراء بعض الدراسات أو التحليلات. لذلك يجب وضع صورة من القراءات التى تم الحصول عليها من الموقع فى ملف البئر والنتائج التى تم التوصل إليها من تجربة السحب من البئر لأنه قد يعاد تقييمها من فترة إلى أخرى فى ضوء ما يستجد من بيانات.

١٠-٨-٢ إختبار خطوة الهبوط Step Drawdown Test

يعتبر إختبار الهبوط تجربة مبدئية للتحقق من مدى كفاءة عملية تطهير البئر ومقدار جودة البئر بجانب تحديد قيمة التصرف الدائم للبئر ونوع المضخة.

١٠-٨-٢-١ إجراء الإختبار

يتكون الإختبار أساسا من الضخ من البئر على مراحل بحيث يكون مقدار الضخ فى كل مرحلة أكبر من المرحلة السابقة مع قياس قيمة الهبوط لسطح المياه داخل البئر المصاحب لكل مرحلة من هذه المراحل.
ونظرا لأن العلاقة بين التصرف والهبوط Yield-drawdown ذات طابع غير خطى Non-linear فإنه يجب ألا يقل عدد المراحل عن ثلاثة ويفضل ٤ مراحل ، على أن يزيد أقصى تصرف فى التجربة عن التصرف التصميمى للبئر بمقدار ٢٠ % على الأقل (شكل ١٠-٢٨). ويقاس الهبوط أثناء الضخ فى البداية على فترات زمنية متقاربة ثم تتزايد حتى يثبت عمليا ، وعادة يستغرق ذلك حوالى ساعتين ، بعد ذلك يرفع مقدار الضخ للمرحلة التالية وتكرر نفس الخطوات حتى المرحلة الأخيرة والتى تستمر حوالى ثلاثة ساعات يوقف بعدها الضخ ثم تجرى عملية رصد استرجاع منسوب سطح المياه داخل البئر.

١٠-٨-٢-٢ تمثيل البيانات

تستخدم بطاقات تدوين المعطيات شكل (١٠-٢٦) فى توقيع العلاقة بين الزمن والهبوط (شكل ١٠-٢٨). ويقدر مقدار الهبوط لكل مرحلة على حدة من علاقة التصرف والهبوط الموضحة أيضا فى الشكل (١٠-٢٨).

١٠-٨-٢-٣ تحليل البيانات

يمكن كتابة العلاقة بين التصرف Q والهبوط S كما يلى :

$$S = AQ + BQ + CQ^n \qquad (10\text{-}14)$$

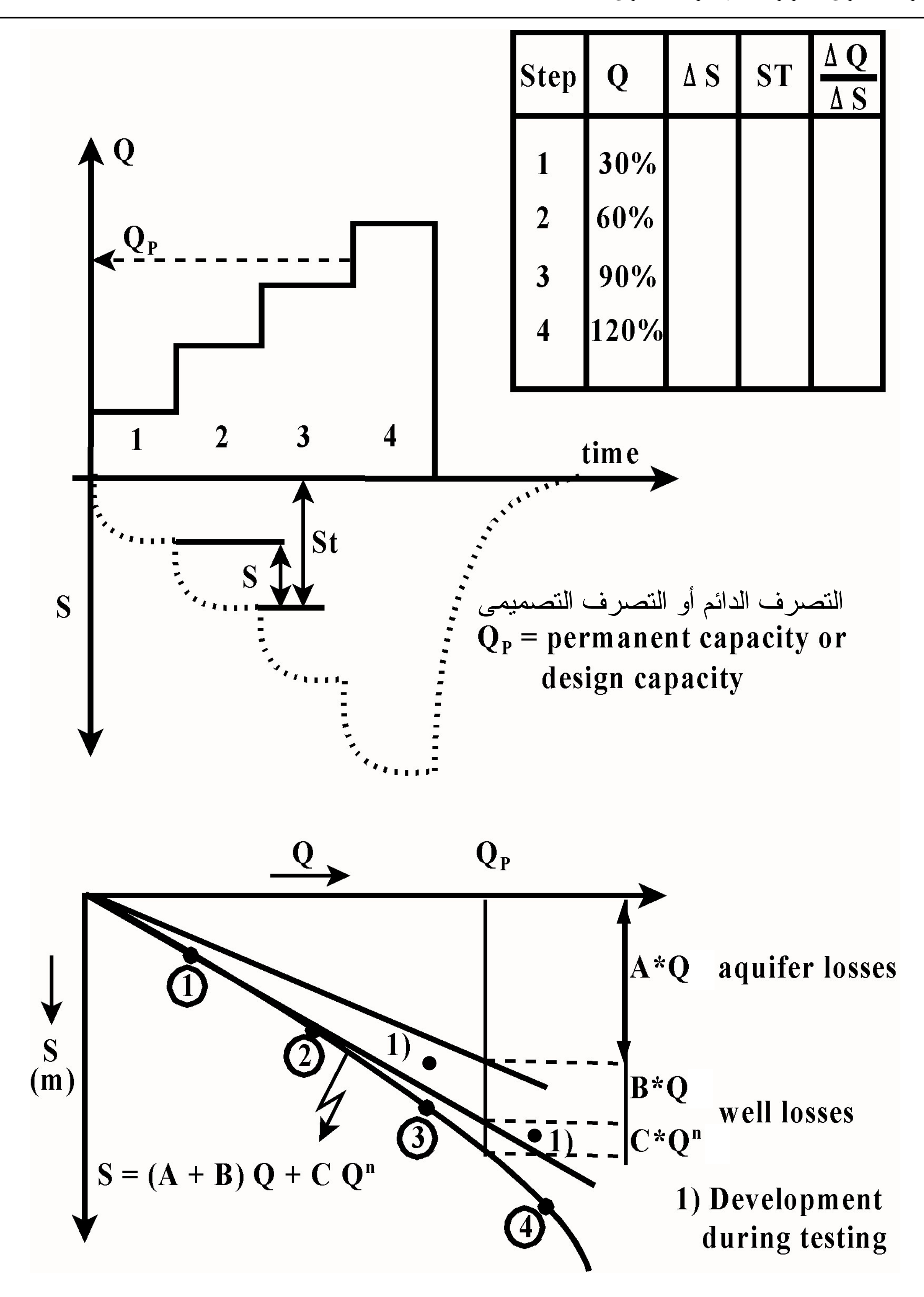
حيث
A = معامل الفقد فى الطبقة الحاملة للمياه
B = معامل الفقد الصفائحى Laminar للبئر
C = معامل الفقد المضطرب Turbulent للبئر
n = معامل يساوى ٢ تقريبا

وإذا كان البئر جيد التصميم والتشييد فإن علاقة التصرف والهبوط يجب أن تعطى الخواص التالية :
- بالنسبة للتصرفات التى تصل قيمتها حتى التصرف التصميمى فإن فاقد البئر المضطرب يكون قليلا أى أن:

$$C.\ Q^n << (A + B)\ Q \qquad (10\text{-}15)$$

وعلى ذلك تكون العلاقة Q - S خطية على وجه العموم ولها ميل مقداره (A + B) .
- يجب أن يكون هذا الخط المستقيم قريبا من الخط $S = AQ$ ويمثل الفرق بينهما مقدار الفواقد الصفائحية فى المنطقة المدمرة Damaged Zone .

والعلاقة السابقة مبنية على فرض أنه لا تحدث هناك زيادة فى تطهير البئر أثناء إجراء إختبار خطوة الهبوط (C, B ثابتان). ولكن إذا ما حدث تطهير خلال الإختبار فإن مقدار الفواقد سوف يتناقص ويظهر ذلك فى المنحنى S – Q شكل (١٠-٢٨).



Step-drawdown test شكل (١٠-٢٨) إختبار خطوة الهبوط

١٠-٨-٣ إختبار البئر Well Test

يعطى تحليل نتائج إختبار خطوة الهبوط توضيحا لحالة تطهير البئر وما إذا كان التصرف المستديم المتوقع من الممكن ضخه. وعندما يتم التطهير بصورة مقبولة وبعد تحديد تصرف البئر المستديم فإنه يلزم إجراء إختبار البئر لتحقيق الأهداف التالية :

- إختبار سلوك البئر خلال ضخ التصرف المستديم.
- حساب معامل النقل للطبقة الحاملة. Transmissivity

١٠-٨-٣-١ إجراء الإختبار

يتم ضخ البئر لمدة ١٢ - ٢٤ ساعة متواصلة بمقدار التصرف المستديم مع قياس الهبوط على فترات زمنية ، ويلاحظ التصرف على فترات زمنية ومتساوية ، وعند نهاية ساعات الضخ تؤخذ عينة من المياه لعمل التحليل الكيميائى لها. وبعد إيقاف الضخ يتم رصد استرجاع منسوب سطح المياه بنفس الأسلوب المتبع أثناء الضخ شكل (١٠-٢٧).

١٠-٨-٣-٢ تمثيل البيانات

يتم تسجيل الأرصاد الحقلية فى الجداول الخاصة بذلك شكل (١٠-٢٦) ، (١٠-٢٧) وتوقع بيانات الزمن والهبوط على مقياس خطى Linear وعلى مقياس نصف لوغاريتمى ، كما توقع بيانات التصرف أيضا على مقياس خطى شكل (١٠-٢٩). وأما بيانات الاسترجاع فتمثل على مقياس نصف لوغاريتمي.

١٠-٨-٣-٣ تحليل وتقييم البيانات

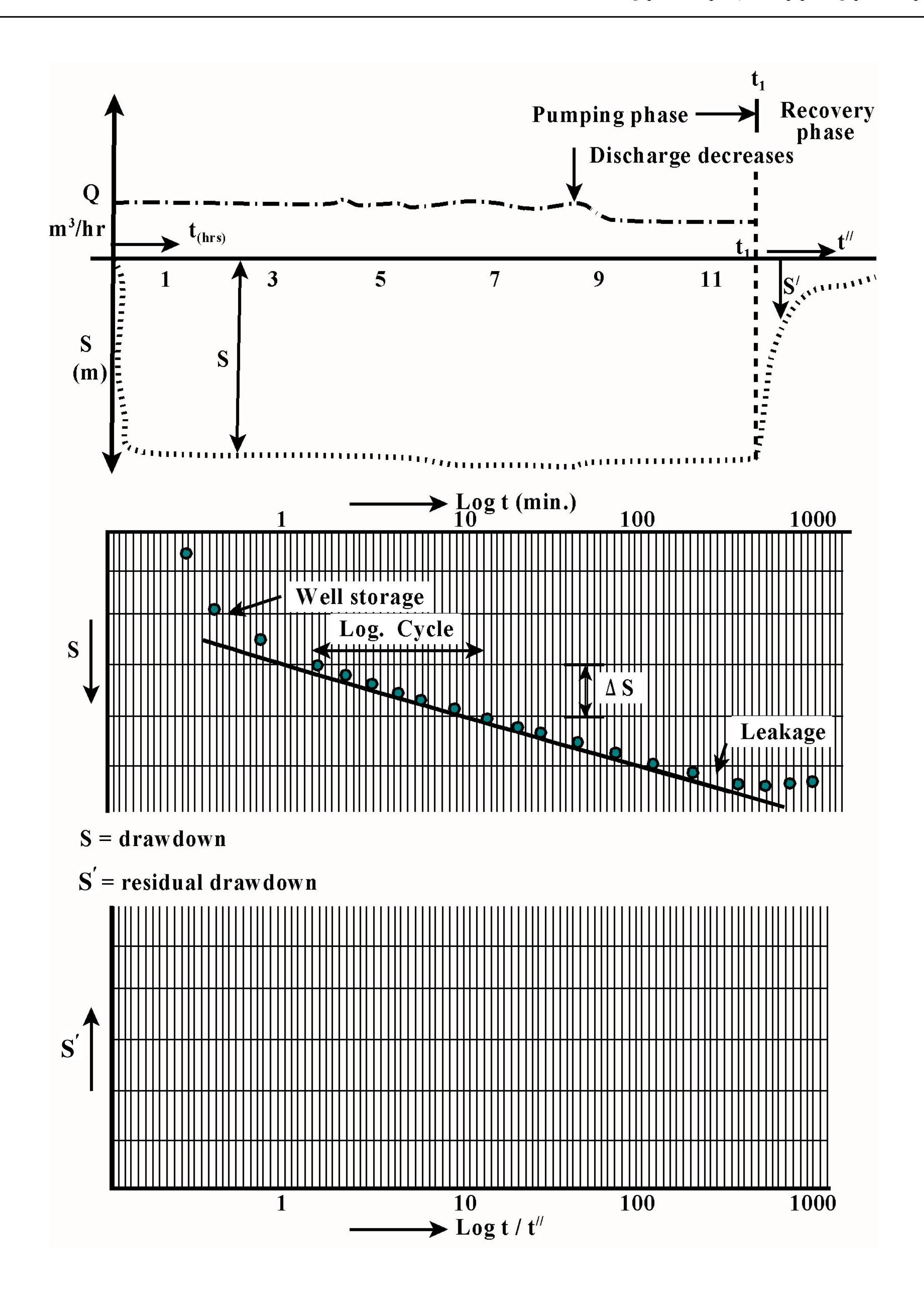
توجد فى المراجع العلمية طرق عديدة يكمن تطبيقها لتحليل وتقييم بيانات إختبارات الآبار ، وفى هذا الجزء من الكود يتم استعراض بعض الطرق الأكثر استعمالا فى حالات السريان المستقر والسريان غير المستقر فى طبقة حاملة للمياه ممتدة بلا حدود من النوع المحصور وغير المحصور وشبة المحصور وشبة غير المحصور.

وفيما يلى الافتراضات الأساسية التى وضعت لتطبيق هذه الطرق :

- الطبقة الحاملة للمياه ممتدة فى جميع الاتجاهات بطريقة غير محدودة.
- الطبقة الحاملة للمياه متجانسة ونفاذيتها متساوية فى جميع الاتجاهات Homogeneous and Isotropic وسمكها ثابت.
- سطح المياه فى الطبقة الحاملة للمياه مستو أفقى تقريبا قبل الضخ وذلك فى منطقة التأثر بالسحب من البئر.
- السحب من البئر ثابت فى حالة السريان المستقر.
- البئر يخترق الطبقة الحاملة للمياه بكامل السمك.

وتضاف الافتراضات التالية فى حالة السريان غير المستقر :

- إهمال التخزين فى البئر.
- المياه التى يتم سحبها من الخزان الجوفى تصرف مباشرة بحيث يحدث هبوط فورى فى سطح المياه (لا ينطبق ذلك على حالة الطبقات المحصورة ذات السحب المتأخر أو شبه المحصورة).



شكل (١٠-٢٩) تحليل بيانات إختبار الضخ Analysis of Pumping Test

أولا : السريان المستقر فى الطبقات الحاملة للمياه المحصورة

يوضح المثال التالى طريقة تحليل البيانات لتجربة إختبار بئر فعلية حيث يوضح الشكل (١٠-٣٠) القطاع الليثولوجى للطبقة الحاملة للمياه والذى تم التوصل إليه باستخدام المعلومات المتوافرة عن حفر الآبار بالمنطقة. ويظهر أن الطبقة الحاملة للمياه تقع على عمق ما بين ١٨ و ٢٥ متر من سطح الأرض ، حيث تخترقها مصافى البئر بالكامل. وركبت شبكة البيزومترات على أبعاد ٠,٨ ، ٣٠ ، ٩٠ ، ٢١٥ متر من محور البئر وعلى أعماق مختلفة. أوضحت أرصاد البيزومترات H_{215} , H_{30} المزودة بمرشحات Filter على أعماق مختلفة أن الطبقات الواقعة على عمق ما بين ٥ ، ٣٠ متر كتيمة. وعلى ذلك تحلل النتائج على أن كمية المياه الواصلة للبئر تأتى من الطبقة الحاملة بين عمق ١٨ ، ٢٥ متر وأن الطبقة السفلى كتيمة. وبعد مضى حوالى ١٤ ساعة من الضخ الثابت من البئر بتصرف $Q = 788\ m^3/day$ كان الهبوط كما يلى :

رقم البيزومتر	$H_{0.8}$	H_{30}	H_{90}	H_{215}
مقدار الهبوط (بالمتر)	2.236	1.088	0.716	0.250

وتتبع الخطوات التالية فى تحليل البيانات :

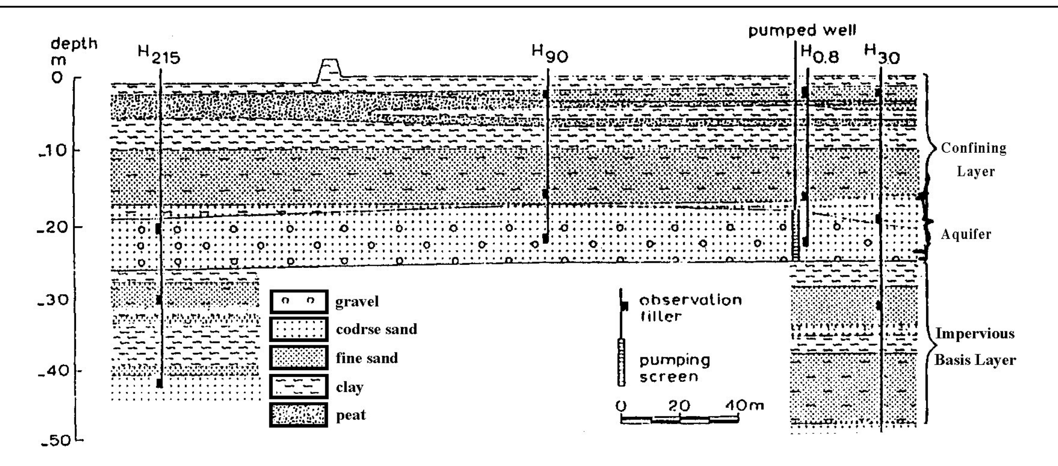
- توقع بيانات الرصد الخاصة بالهبوط فى سطح المياه لكل بيزومتر كدالة فى الوقت على ورقة واحدة من النوع نصف اللوغاريتمى حيث يكون الهبوط على المحور الرأسى بمقياس رسم عادى ويكون الوقت على المحور الأفقى من النوع اللوغاريتمى.
- يرسم منحنى العلاقة بين الهبوط مع الوقت لكل بيزومتر على حدة والذى يكون الأكثر مرورا بالنقاط التى تم رصدها Best fit Curve ويمكن ملاحظة أن هذه المنحنيات تسير موازية بعد فترات زمنية كبيرة وهذا يعنى أن الانحدار الهيدروليكى ثابت تقريبا وأن السريان فى الطبقة الحاملة للمياه يمكن اعتباره مستقرا تقريبا.
- يتم التعويض عن قيم الهبوط عند السريان المستقر لأى بيزومترين h_2, h_1 فى معادلة ثيم Thiem المعادلة رقم (١٠-٨) مع القيم المناظرة لكل من r_1, r_2 وبمعرفة قيم Q يمكن الحصول على قيم KD المطلوبة.

تكرر هذه العملية لكافة تجمع أى بيزومترين وتحسب قيم KD المناظرة لكل بيزومترين وتؤخذ القيمة المتوسطة لتمثل الموقع.

وبالتعويض بالنتائج السابقة فى معادلة ثيم Thiem ينتج :

$$KD = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$= \frac{788}{2\pi(1.088 - 0.716)} \ln \frac{90}{30} = 370\ m^2/day$$



شكل (١٠-٣٠) قطاع تتابع الطبقات لتجربة ضخ فعلية
Lithological Cross-Section of a real Pumping Test

ثانيا : السريان غير المستقر فى الطبقات المحصورة

تطبق معادلـة ثيم Thiem علـى نطـاق واسـع لتحديد معامـل النفاذية غير أن الظروف فى الطبيعة تحتاج وقتا طويلا للوصول إلى الاستقرار ولذلك تعتبر هذه نقطة ضعف عند استخدام هذه الطريقة ، ويتم التغلب على هذه الصعوبة باستخدام طريقة تـايس Theis والتى تعتمد على معادلة للتصرف فى حالة السريان غير المستقر حيث أدخل فى المعادلة الوقت كعامل محدد وكذلك معامل التخزين.

وتعتمد طريقة تايس Theis على أنه عند اختراق بئر لطبقة حاملة للمياه ومحصورة وغير محددة الامتداد مـع السحب منها فى صورة تصرف ثابت من البئر فإن تأثير السحب سوف يمتد لوقت أطول. وأن معدل انخفـاض سطح المياه مضروبا فـى معامـل التخزين Storage Coefficient للمساحة المتأثرة سوف يعطى التصرف المار بالبئر.

ولمـا كـان سحب المياه يجب أن ينتج عن الانخفاض فى التخزين فى هذه الطبقة فإن ذلك سوف يستمر فى الهبوط طالمـا كانت الطبقة الحاملـة للميـاه ممتدة إلـى مالا نهاية. وبذلك يجب أن يلاحظ أن حالة السريان المستقر لا توجد فى الطبيعة نظريا وأن معدل الهبوط فى سطح المياه يقل تدريجيا كلما زادت دائرة تأثير السحب من البئر ويصبح صغيرا ويمكن إهماله عندما تكون دائرة التأثير كبيرة جدا وفى هذه الحالة يمكن اعتباره سريانا مستقرا.

ومعادلة ثايس Theis فى حالة السريان غير المستقر تكون كالآتى :

$$S = \frac{Q}{4\pi \text{KD}} \int_u^\infty \frac{e^{-Y}}{Y} dy = \frac{Q}{4\pi \text{KD}} W(u) \qquad (10\text{-}16)$$

$$S = \frac{4 \text{ KD tu}}{r^2}, \; u = \frac{r^2 S}{4KDt} \qquad (10\text{-}17)$$

حيث

s = الهبوط فى البيزومتر الذى تم قياسه على مسافة r بالمتر من بئر السحب بعد مرور وقت مقداره t باليوم

Q = التصرف الثابت الذى يؤخذ من البئر بالمتر المكعب / يوم

S = معامل التخزين (لا وحدات له)

KD = معامل النقل للطبقة الحاملة Transmissivity بالمتر مربع / يوم

t = الوقت باليوم منذ بداية السحب من البئر

W (u)= دالة البئر ويمكن حسابها من المعادلة (١٠-١٨)

u= متغير رياضى لابعاد له ويعطى بالمعادله (١٠-١٧)

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (10\text{-}18)$$

وهو ما يعرف بدالة ثايس Theis

ويتضح من معادلة السريان غير المستقر أنه إذا أمكن قياس الهبوط عند قيمة واحدة أو قيم متعددة r فى أوقات متعددة ومعرفة تصرف البئر Q فإن قيم KD, S يمكن تحديدها. ولكن نظرا لأن تحديد مجهولين من شكل المنحنى الأسى التكاملى غير ممكن فى صورة صريحة لذلك يوجد عدة طرق تقريبية بالرسم للحصول على حل لهذه الحالة.

طريقة ثايس Theis

وتبنى على الافتراضات التالية بالإضافة إلى الافتراضات السابق ذكرها :

- الطبقة الحاملة للمياه من النوع المحصور.
- السريان للبئر متغير مع الوقت. أى أن الهبوط يختلف مع الوقت ولا يمكن إهماله وكذلك التغير فى الانحدار الهيدروليكى غير ثابت ويختلف مع الوقت.
- المياه التى تؤخذ من الخزان مباشرة تؤثر فى هبوط سطح المياه.
- قطر البئر صغير نسبيا وبذلك يمكن إهمال التخزين فى البئر.

وتلخص هذه الطريقة فى الخطوات التالية :

يتم تحضير منحنى نموذجى لدالة البئر W (u) Type Curve والذى يرسم على ورق لوغاريتمى فى الاتجاهين كدالة فى u أو ترسم علاقة بين 1/u, W (u) كالمبين فى الشكل (١٠-٣١).

- يرسم منحنى أخر للعلاقة بين S مع r/t على ورقة شفافة أخرى لوغاريتمية فى الاتجاهين وبنفس مقياس الرسم للدورة اللوغاريتمية. حيث تجمع كافة البيانات التى تم الحصول عليها من كل البيزومترات . فى حالة استخدام الشكل الطبيعى للمنحنى فإنه يرسم العلاقة بين r/t, s ويلاحظ أنه فى حالة التصرف الثابت من البئر Q فإن الهبوط فى سطح المياه s يتغير مع r/t بنفس الطريقة التى يتغير فيها W (u) مع u حيث يجب أن يتطابق المنحنيان.
- يوضع المنحنيان فوق بعضهما مع ضرورة المحافظة على أن تكون المحاور متوازية ويتم تحديد أحسن تطابق بين المنحنيين ما بين البيانات التى تم رصدها ومنحنى دالة البئر Theis كالموضح بالشكل (١٠-٣٢).
- تختار نقطة A فى الجزء الذى حدث به تطابق بين المنحنيين حيث يحدد قيم u , W (u) وكذلكt/r المناظرة لهذه النقطة.

ولتحديد قيمة KD يمكن التعويض فى المعادلة:

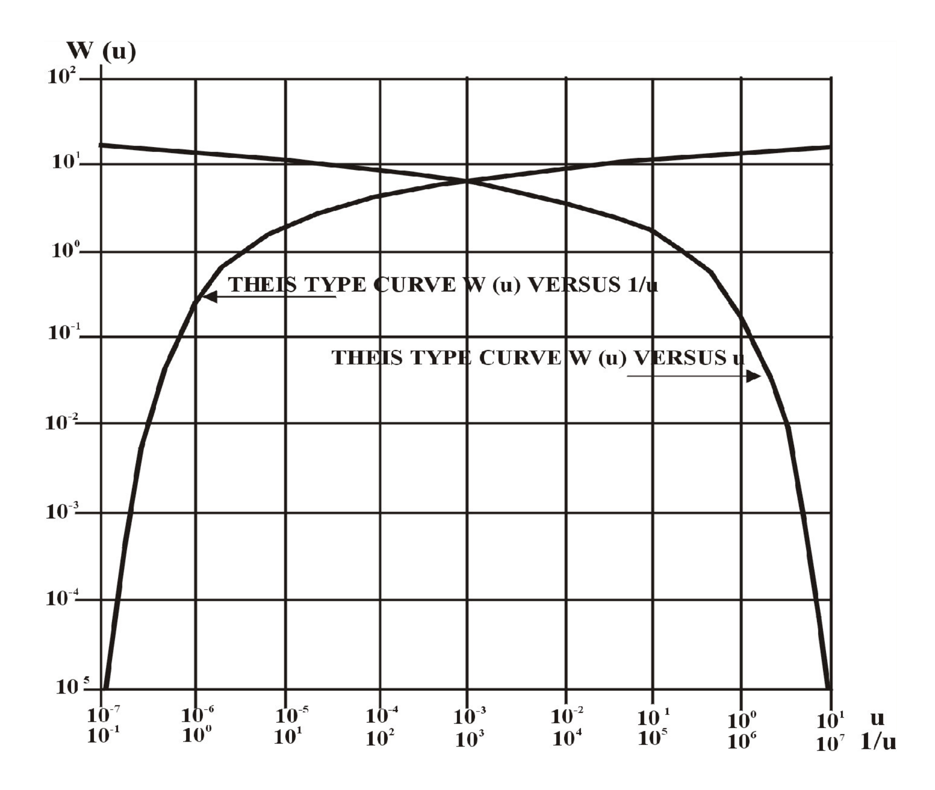
$$KD = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \qquad (10\text{-}19)$$

كما تحدد قيمة S بتطبيق قيم KD , t/r وكذلك u فى المعادلة :

$$S = 4\,KD\,(t/r^2)\,u \qquad (10\text{-}20)$$

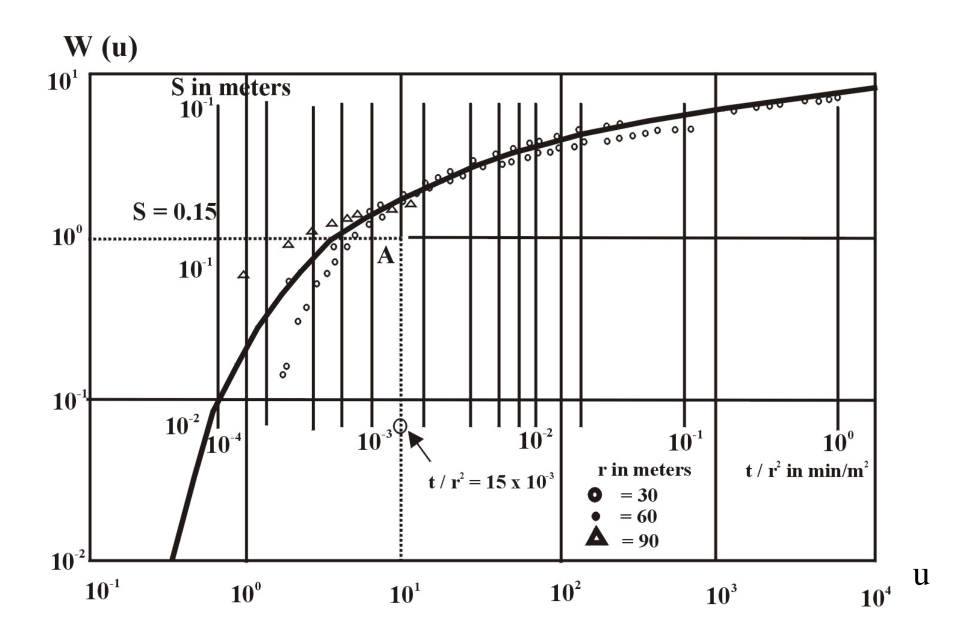
ويجب أن تراعى الاعتبارات التالية :
عند استخدام منحنى Theis (أو أى طريقة أخرى تعتمد على مثل هذه المنحنيات) يجب أن لا يعطى وزن كبير للجزء الأول من هذه المنحنيات وبالتالى البيانات الأولى حيث أن مثل هذه البيانات لا تصور الحقيقة والأسس التى بنيت عليها نظرية الحسابات لمعادلة الهبوط حيث تعتمد هذه المعادلات على بعض الافتراضات الأخرى منها أن التصرف يظل ثابتا وأن سحب المياه المخزونة فى الطبقة الحاملة يحدث لحظيا ومباشرة ويتناسب مع التغير فى خط الضغط. وهذا ما يسبب عدم التطابق بين النظرية والتصرف الفعلى وخاصة فى المراحل الأولى من تشغيل الطلمبة. ومع زيادة فترة السحب فإن هذا السبب سوف يتلاشى تدريجيا ويحدث تطابق بين الفكرة النظرية التى بنيت عليها المعادلة وما يحدث فى الطبيعة.

ويجب ألا تستغل معادلة Thies للسريان غير المستقر استغلالا خاطئا باستخدامها مع نتائج السحب من بئر لفترة خمسة أو عشرة دقائق حيث يكون ذلك خطأ جسيما.



شكل (١٠-٣١) منحنيات دالة البئر ثايس

Theis Type Curves : for W (u) versus u and W (u) versus 1/u



شكل (١٠-٣٢) مثال لتحليل بيانات إختبار ضخ بطريقة ثايس
Analysis of Data from a Pumping Test Theis Method

طريقة تشاو Chow

وفى هذه الطريقة يتم استخدام البيانات للحصول على منحنيات كما هو متبع فى طريقة Theis كما تطبق فى حالات قيم r الصغيرة وقيم t (الزمن) الكبيرة كما هو الحال فى طريقة جاكوب Jacob التالية. ويلاحظ أن طريقة Chow تعتمد على نفس الافتراضات التى بنيت عليها طريقة Theis ومعادلته.

وللحصول على قيم u, W (u) التى تقابل قيما محددة للهبوط s الذى تم قياسه بعد مرور فترة زمنية محددة t فقد قام Chow باستخدام دالة أخرى.

$$F(u) = \frac{W(u)\, e^{u}}{2.30} \qquad (10\text{-}21)$$

حيث يمكن حساب F(u) بسهوله من الشكل رقم (١٠-٣٣)

وطريقة الاستخدام كالآتى :

- توقع لأحد البيزومترات العلاقة بين الهبوط s مع الوقت على ورق نصف لوغاريتمى (حيث يكون الوقت على المقياس اللوغاريتمي).
- يتم إختيار أى نقطة A متوسطة على المنحنى لنفس المنطقة التى وقعت ثم يرسم مماس عند هذه النقطة. كما هو موضح على الشكل (١٠-٣٤).
- تحسب قيمة F(u) للنقطة A من المعادلة:

$$F(u) = \frac{S_A}{\Delta S_A} \qquad (10\text{-}22)$$

- وبمعرفة قيمة F(u) فإنه يمكن تحديد قيمة W (u) المناظرة لها وبالتالى u باستخدام النوموجرام الموضح بالشكل (١٠-٣٣).
- تسجل قيمة t على محور الوقت الموضح للبيانات التى تم رصدها حيث يعوض عن القيم المناظرة فى المعادلات (١٠-١٦) ، (١٠-١٧) ويتم حلها للحصول على قيم. s, KD

طريقة جاكوب Jacob

تعتمد هذه الطريقة على عمل تقريب لمعادلة Theis والتى تربط الهبوط فى سطح المياه s كدالة فى u باستخدام المتوالية التالية :

$$s = \frac{Q}{4\pi KD}\left(-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} \ldots\ldots\ldots\right) \qquad (10\text{-}23)$$

ويلاحظ أن قيمة u تقل كلما زاد الوقت المستخدم فى سحب المياه من البئر t وبالتالى عند زيادة قيم t أو قيم r الصغيرة فإن كافة الحدود بعد ln u فى هذه المتوالية يمكن إهمالها. وبذلك يمكن تحديد الهبوط لقيم u التى تقل عن ٠,٠١ فى صورة المعادلة التالية:

$$s = \frac{Q}{4\pi KD}\left(-0.5772 - \ln \frac{r^2 S}{4 KD t}\right) \qquad (10\text{-}24)$$

$$s = \frac{2.3 Q}{4\pi KD} \operatorname{Log} \frac{2.25 KD t}{r^2 S} \qquad (10\text{-}25)$$

وعند توقيع العلاقة بين s كدالة مع الزمن t فى صورة لوغاريتمية فإنها تظهر فى صورة خط مستقيم كما هو موضح فى الشكل (١٠-٣٥). ويمد الخط ليقطع محور الزمن عندما يكون الهبوط s مساويا للصفر ويكون التقاطع فى هذه الحالة ذو إحداثيات $s = 0$ والوقت $t = t_0$ وبالتعويض فى المعادلة (١٠-٢٥) نحصل على:

$$s = \frac{2.3 Q}{4\pi KD} \operatorname{Log} \frac{2.25 KD t_0}{r^2 S} = 0 \qquad (10\text{-}26)$$

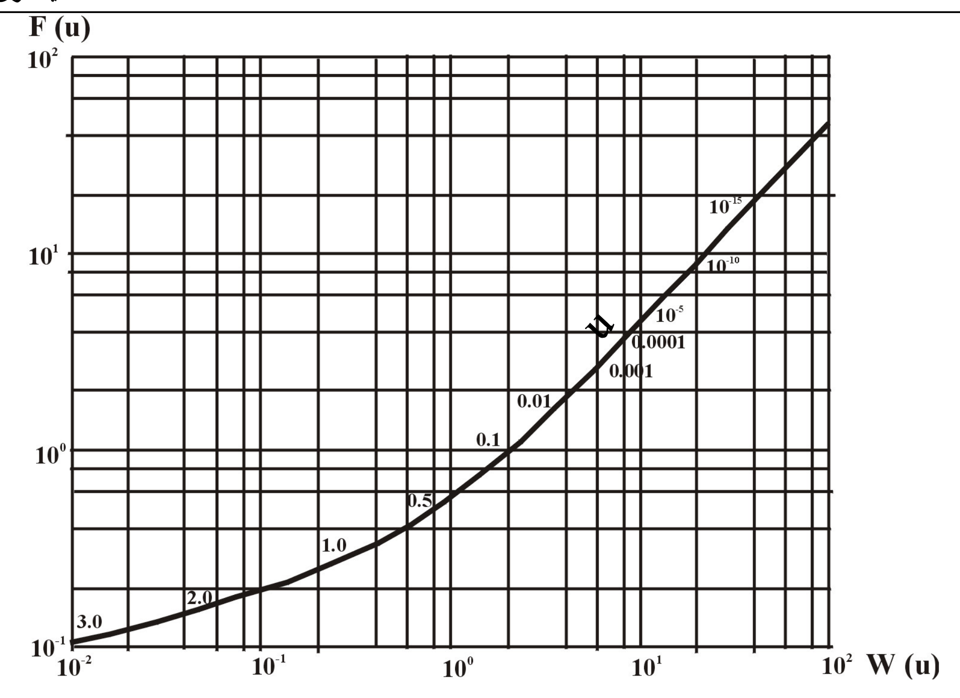
ولتحقيق ذلك يجب أن يكون:

$$\frac{2.25 KD t_0}{r^2 S} = 1 \qquad (10\text{-}27)$$

وبأخذ فرق الهبوط Δs لفترتين زمنيتين بينهما دورة لوغاريتمية كاملة يمكن استنتاج القيمة : KD

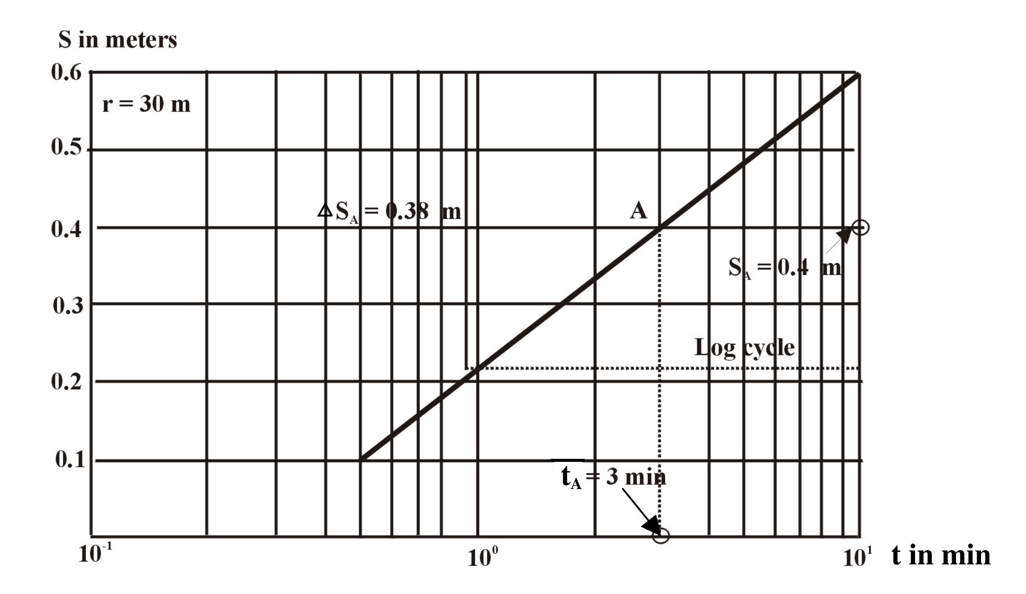
$$KD = \frac{2.3 Q}{4\pi \Delta s} \qquad (10\text{-}28)$$

ويلاحظ أن هذه الطريقة تعتمد أيضا على نفس الافتراضات السابق ذكرها فى طريقة Theis ويضاف إليها أن قيم u يجب أن تكون صغيرة وتقل عن ٠,٠١ أى أن تكون قيم r صغيرة وقيم t كبيرة جدا.



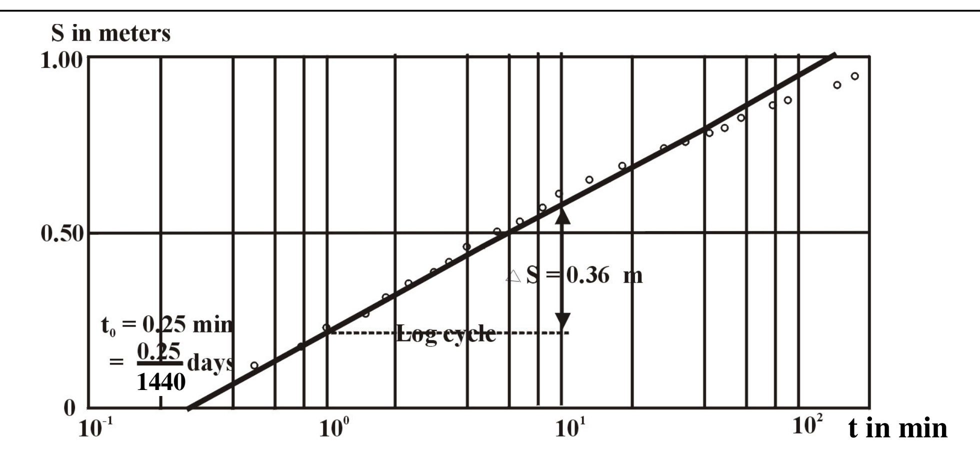
شكل (١٠-٣٣) منحنى نوموجرام تشاو

Chow nomogram giving the relation between F(u), W (u) and u



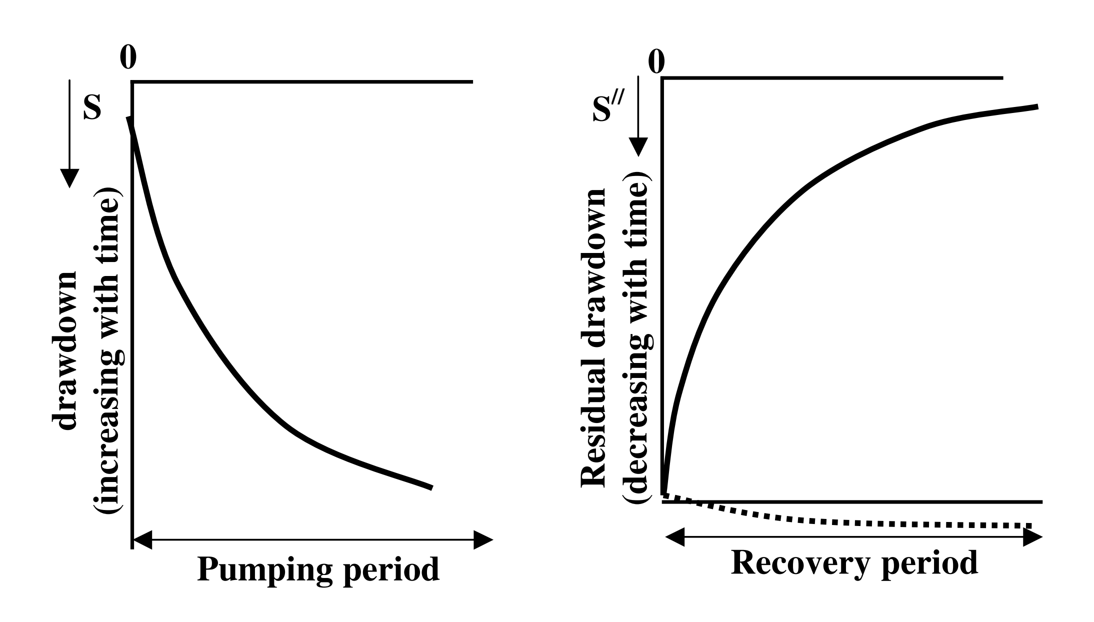
شكل (١٠-٣٤) تحليل بيانات إختبار ضخ بطريقة تشاو

Analysis of data from a pumping test with the Chow method



شكل (١٠-٣٥) تحليل بيانات إختبار ضخ بطريقة جاكوب

Analysis of data from a pumping test (r = 30 m) with the Jacob method



شكل (١٠-٣٦) رسم تخطيطى يبين علاقة كل من الهبوط والجزء المتبقى من الهبوط مع الزمن فى إختبار الاسترجاع

Schematic time-drawdown / residual drawdown diagram

طريقة Theis للاسترجاع Recovery Test

بعد الانتهاء من التجربة وإيقاف الضخ سيتوقف معه الهبوط فى سطح المياه ثم يبدأ فى الارتفاع والعودة إلى وضعه الأصلى وهو ما يسمى بالاسترجاع Recovery للبئر. ويمكن قياس ارتفاع الجزء المتبقى من الهبوط s أى الفرق بين منسوب سطح المياه الأصلى ومنسوب سطح المياه الفعلى بعد مرور فترة زمنية t من وقف السحب من البئر (شكل (١٠-٣٦)) . ومن واقع هذه النتائج يمكن حساب معامل النقل Transmissivity.

ويحدد الهبوط الحقيقى s'' من تجربة الاسترجاع بالمعادلة :

$$s'' = \frac{Q}{4\pi KD}\left(\ln\frac{4KDt}{r^2 S} - \ln\frac{4KDt''}{r^2 S''}\right) \qquad (10\text{-}29)$$

حيث

s'' = الهبوط الحقيقى فى البئر بالمتر Residual Drawdown

r = المسافة بين بئر الملاحظة وبئر السحب وعند استخدام بيانات بئر السحب فإنه يستخدم r_w بدلا من r وهو نصف قطر البئر .

S'' = معامل التخزين أثناء الاسترجاع (لا وحدات له)

S = معامل التخزين أثناء السحب من البئر (لا وحدات له)

t = الوقت المار بالأيام من بداية السحب من البئر

t'' = الوقت المار بالأيام من انتهاء السحب من البئر

Q = معدل التغذية = معدل السحب من البئر بالمتر المكعب / يوم

وعندما تكون S , S'' ثابتة ومتساوية فإن المعادلة رقم (١٠-٢٩) تصبح :

$$s'' = \frac{2.30\,Q}{4\pi KD}\,\mathrm{Log}\,\frac{t}{t''} \qquad (10\text{-}30)$$

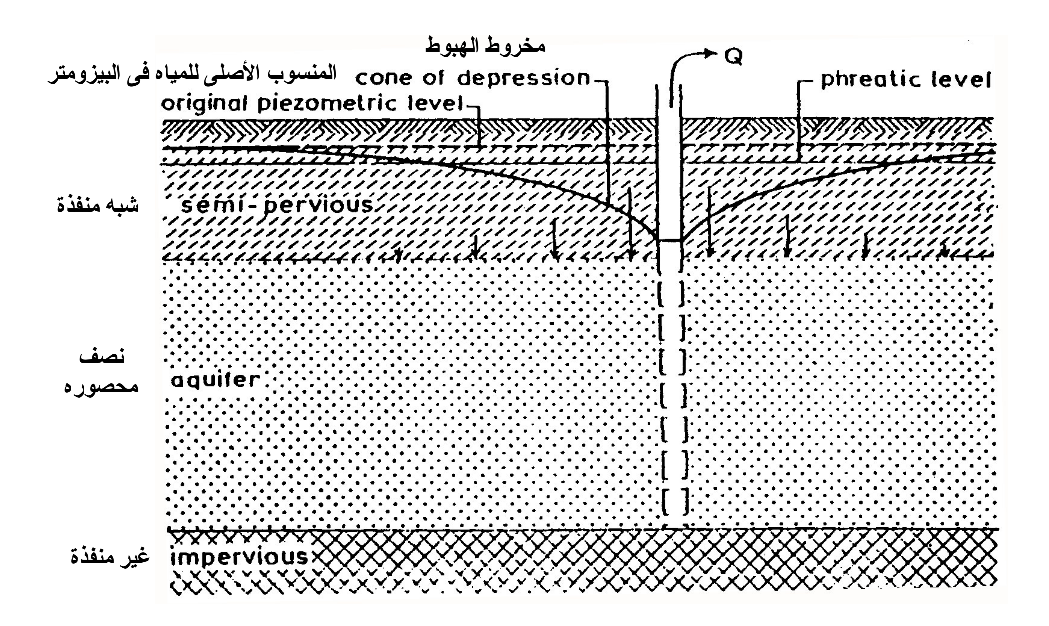
ثالثا : السريان المستقر فى الطبقة الحاملة للمياه نصف المحصورة

تمثل هذه الحالة المناطق التى بها أراضى رسوبية مثل دلتا الأنهار والشواطئ والمناطق المنخفضة من وديان الأنهار أو ما كان يمثل بحيرات أو أحواض تخزين سابقا.

عند السحب من الطبقة الحاملة للمياه ونصف المحصورة كالمبينة بالشكل رقم (١٠-٣٧) فإن السحب لا يتم فقط من الطبقة الحاملة للمياه الرئيسية بل أيضا من الطبقة التى تعلوها وشبه المنفذة مع الفرض بأن الطبقة العليا مغمورة جزئيا بالماء. ونتيجة السحب من البئر فإن الضاغط البيزومترى للطبقة الحاملة للمياه سينخفض مما يتسبب فى وجود ضغط فرقى بين الطبقة الحاملة للمياه والطبقة شبه المنفذة التى تعلوها. وينتج عن ذلك حركة فى الماء الأرضى إلى أسفل من الطبقة العليا إلى الطبقة الحاملة للمياه ، والتى يتم السحب فيها وتكون كمية المياه المتسربة من الطبقة العليا q متناسبه طرديا مع الفرق بين الضاغط فى الطبقتين وتتناسب عكسيا مع المقاومة الهيدروليكية C للجزء المغمور من الطبقة شبة المسامية العليا أى أن:

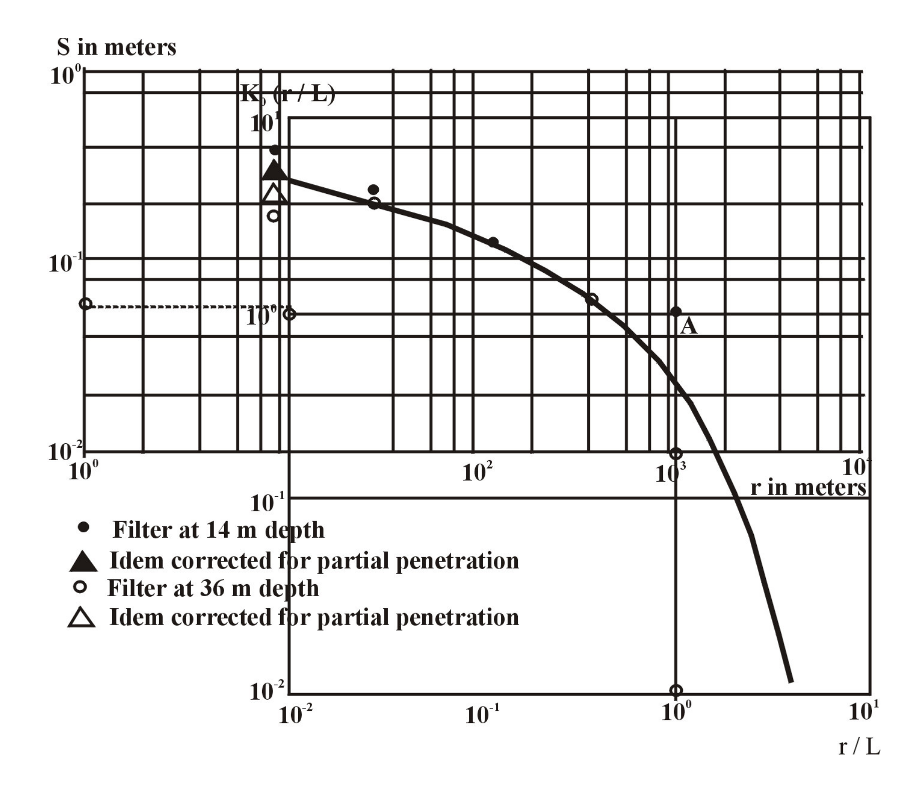
$$q = \frac{h_1 - h_2}{C} \qquad (10\text{-}31)$$

ولذلك فإن تطبيق المعادلات الخاصة بالطبقات المحصورة أو غير المحصورة فى هذه الحالة سوف يؤدى إلى أخطاء كبيرة. ونظريا فإن حالة الطبقات الحاملة للمياه وهى نصف محصورة لا تحدث بها حالة السريان المستقر نظرا لاستمرار التغذية من الطبقة شبة المنفذة العليا ، ولكن بعد مرور فترة زمنية من السحب من البئر سوف يحدث نوع من الاتزان ما بين تصرف البئر ومعدل التغذية من السريان الرأسى من خلال الطبقة العلوية ، وهذا الاتزان سوف يستمر ما دام السطح الحر للماء فى الطبقة العلوية ثابتا.



شكل (١٠-٣٧) قطاع يمثل حالة السريان المستقر فى طبقة حاملة للمياه نصف محصورة

Schematic cross section of a pumped semi-confined aquifer



شكل (١٠-٣٨) تحليل بيانات إختبار ضخ بطريقة دى جلى

Analysis of data from pumping test "Dalem" with De Glee method

طريقة دى جلى De Glee

وتعتمد هذه الطريقة على الافتراضات السابق ذكرها بالإضافة إلى أن :

- الطبقة تحت الإختبار من النوع نصف المحصور.
- السريان للبئر يقع تحت ظروف السريان المستقر.
- السطح الحر يظل ثابتا تقريبا (الهبوط فى هذا السطح الحر لا يزيد عن ٥ % من السمك المبتل من الطبقة نصف المسامية العلوية).
- $L > 3D$.

وفى هذه الحالة يكون الهبوط :

$$S_m = \frac{Q}{2\pi KD} K_0 (\frac{r}{L}) \qquad (10\text{-}32)$$

حيث

s_m = الهبوط الأقصى (فى حالة السريان المستقر) بالمتر فى سطح المياه فى بيزومتر على مسافة r مترا من بئر السحب

Q = التصرف المسحوب من البئر بالمتر المكعب / يوم

$L = \sqrt{KDC}$ = ويمثل معامل التسرب بالمتر

$C = D^{/} / K^{/}$ = المقاومة الهيدروليكية للطبقة نصف المسامية العلوية باليوم

K_0 (x) = دالة بيسيل Bessel المعدلة من النوع الثانى والدرجة صفر (Hankel Function)

وتوجد قيم هذه الدالة فى المراجع الرياضية

وتتلخص هذه الطريقة فى الخطوات التالية :

ترسم قيم K_0 (x) كدالة فى قيم x على ورق بيانى لوغاريتمى فى الاتجاهين الرأسى الأفقى

ترسم على ورقة أخرى شفافة من نفس النوع اللوغاريتمى فى الاتجاهين بنفس مقياس الرسم قيم الهبوط القصوى للحالة المستقرة فى كل بئر S_m ملاحظة مع المسافة r أى بعدها عن محور بئر السحب.

يتم وضع المنحنيين فوق بعضهما مع جعل المحاور فى الورقتين متوازيين حتى يمكن الوصول إلى أكبر تطابق ممكن بين القراءات الموقعة وشكل المنحنى للدالة كما هو موضح بالشكل (١٠-٣٨).

يتم إختيار نقطة متوسطة للجزء الواقع تحت التطابق بين المنحنيين ولتكن النقطة A والتى يكون لها إحداثيات s, r من أحد المنحنيين وكذلك $X = r / L, K_0 (r / L)$

وبالتعويض فى المعادلة (١٠-٣٢) نحصل على:

$$KD = \frac{Q}{2\pi S_m} K_0 (\frac{r}{L}) \qquad (10\text{-}33)$$

$$C = \frac{L^2}{KD} = \frac{1}{(r/L)^2} * \frac{r^2}{KD} \qquad (10\text{-}34)$$

ومنهما يمكن حساب C, KD

طريقة حنتوش جاكوب Hantush Jacob

تعتمد هذه الطريقة على التقريب الذى يحدث عندما تكون قيم r / L صغيرة $(r / L < 0.05)$ حيث يمكن تقريب المعادلة (١٠-٣٢) إلى :

$$S_m = \frac{2.30\,Q}{2\,\pi\,KD}\,(\text{Log}\,1.12\,\frac{L}{r}) \qquad (10\text{-}35)$$

وترسم العلاقة بين r, S_m على ورق نصف لوغاريتمى بحيث يكون r على المحور اللوغاريتمى وتظهر فى صورة خط مستقيم للمدى الذى يكون فيه r / L صغير. ويعبر عن ميل الجزء المستقيم من المنحنى لوحدة الدوران اللوغاريتمى للمتغير r بالعلاقة :

$$\Delta S_m = \frac{2.30\,Q}{2\,\pi\,KD} \qquad (10\text{-}36)$$

وعند مد الخط المستقيم يتقاطع مع محور r عند النقطة r_0 حيث يكون الهبوط مساويا للصفر. وبذلك يكون $S = 0$ عند $r = r_0$ وتكون المعادلة (١٠-٣٥) كالآتى :

$$0 = \frac{2.30\,Q}{2\,\pi\,KD}\,(\text{Log}\,1.12\,\frac{L}{r_0}) \qquad (10\text{-}37)$$

$$1.12\,\frac{L}{r_0} = \frac{1.12}{r_0}\,\sqrt{KDC} = 1 \qquad (10\text{-}38)$$

$$C = \frac{(r_0 / 1.12)^2}{KD} \qquad (10\text{-}39)$$

رابعا : السريان غير المستقر فى الطبقات الحاملة للمياه نصف المحصورة

$$S = \frac{Q}{4\,\pi\,KD}\int_u^{\infty} \frac{1}{y}\,\exp\,(-y - \frac{r^2}{4\,L^2\,u})\,dy \qquad (10\text{-}40)$$

$$S = \frac{Q}{4\,\pi\,KD}\,W\,(w, r / L) \qquad (10\text{-}41)$$

المعادلة (١٠-٤١) هى نفس المعادلة كما فى حالة Theis لدالة البئر. ولكن يوجد لها معاملان فى التكامل هما $u, r / L$ وتعتمد هذه الطريقة على نفس الافتراضات السابق ذكرها بالإضافة إلى أن :

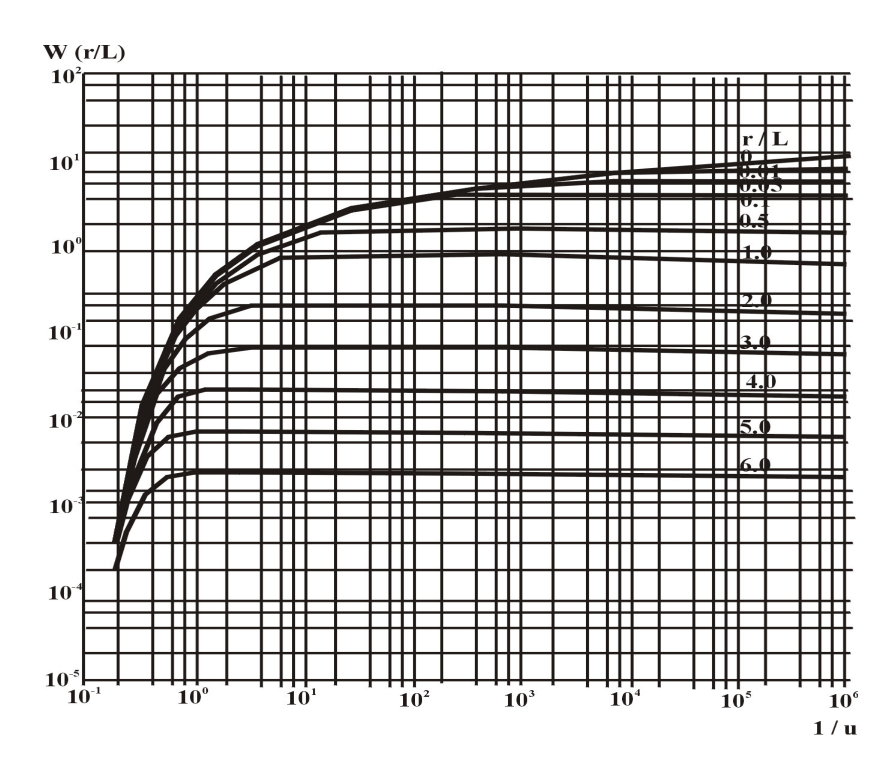
- الطبقة الحاملة للمياه نصف محصورة.
- السريان للبئر غير مستقر أى أن التغير فى الهبوط فى سطح المياه وفى الانحدار الهيدروليكى يتغيران مع الوقت.
- المياه التى يتم سحبها من الخزان يتم صرفها لحظيا مما يسبب هبوطا فى ضاغط المياه.
- قطر البئر صغير نسبيا بحيث يمكن إهمال التخزين فى البئر.

وفى هذه الطريقة يتم رسم مجموعة المنحنيات لقيم r / L . وذلك باستخدام جداول الدالة W (u, r / L) والتى تم وضعها بمعرفة حنتوشHantush .

ويكون الرسم على ورق بيانى لوغاريتمى فى الاتجاهين ورسم العلاقة بين W (u, r / L) كدالة فى 1/u للقيم المختلفة r / L . مما نحصل معه على مجموعة منحنيات كالموضحة فى الشكل (١٠-٣٩) وترسم على ورقة أخرى بيانية شفافة لها نفس الشكل اللوغاريتمى فى الاتجاهين بنفس مقياس الرسم العلاقة بين t / r , s .

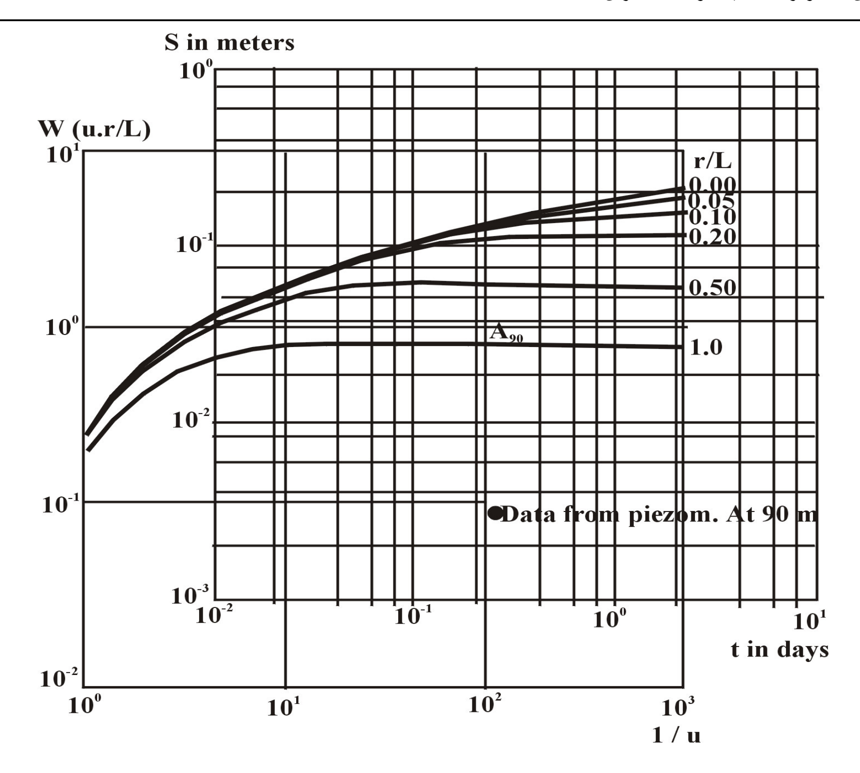
- يطبق الرسمان على بعضهما ويتم ضبط مجموعة المنحنيات بحيث تتطابق معا مع المحافظة على توازى المحاور بقدر الإمكان كما هو موضح فى الشكل (١٠-٤٠).
- تختار نقطة شبة إنطباق بين الشكلين وتحدد قيم W (u, r / L) , 1 / u من أحد الأشكال وقيم t/r,s أو t من الشكل الأخر.
- يعوض بقيم W (u, r / L) وقيم s ومعرفة قيمة Q فى المعادلة (١٠-٤١) ويتم حساب KD .
- وبالتعويض عن قيمة KD التى حصلنا عليها وقيم t, t / r , 1 / u فى المعادلة (١٠-٢٠) يمكن حلها للحصول على قيم s .

ويجب ملاحظة أنه من الصعب الحصول على تطابق وحيد بين الرسمين ما لم يكن هناك عدد كاف من البيانات التى تم الحصول عليها وتقع فى نفس الفترة التى حدث فيها تسرب وهذا التسرب يمكن إهماله ما لم تكن قيم r / L كبيرة بدرجة كافية.



شكل (١٠-٣٩) مجموعة منحنيات دالة والتون

Family of Walton's Type Curves W (u, r / L) versus u for different values of r / L



شكل (١٠-٤٠) تحليل بيانات إختبار ضخ بطريقة والتون
Analysis of data from pumping test "Dalem" (r = 90 m) with the Walton method

خامسا : السريان غير المستقر فى طبقة حاملـة للمياه غير محصورة ولها سحب متأخر وكذلك فى طبقة نصف غير محصورة

فى حالة الطبقات غير المحصورة يتم سحب المياه بواسطة الآبار من الخزانات الجوفية عن طريق :

- الصرف تحت تأثير الجاذبية.
- إنضغاط الطبقة الحاملة للمياه.
- تمدد الماء نتيجة تخفيض ضغط الماء الأرضى بالسحب.

ومثال ذلك حالة طبقة حاملة للمياه متجانسة ومكونة من حبيبات خشنة وتحدها من أسفل طبقة كتيمة ومن أعلى طبقة من التربة ذات حبيبات ناعمة حيث يكون خط الانحدار الهيدروليكى أقل منه بالنسبة للطبقة الحاملة للمياه ولكن ليس بالدرجة التى يمكن معها تسميتها نصف محصورة لذلك تسمى نصف غير محصورة.

وسحب المياه من مثل هذه الطبقات سوف يحدث هبوطا فى منسوب سطح المياه فى الطبقة العلوية ولكن بنسبة تقل عن السطح البيزومترى للطبقة السفلية التى يتم سحب المياه منها كما هو موضح بالشــكل رقم (١٠-٤١) . لذلك لا يجوز تطبيق التحليل لحالة الطبقة نصف المحصورة فى هذه الحالة.

ولكن يؤخذ فى الاعتبار فى هذه الحالـة السحب المتأخر لهذه الطبقات وتأثيره الناتج عن بطء الصرف تحت تأثير الجاذبية من هذه الطبقات.

طريقة بولتون Boulton

ولاستخدام هذه الطريقة يجب أن تتحقق الشروط التالية :

- الشروط العامة السابق ذكرها.
- الطبقة الحاملة للمياه غير محصورة ولكن تظهر لها خاصية السحب المتأخر أو أن الطبقة تمثل بأنها نصف غير محصورة.
- السريان نحو البئر غير مستقر.
- قطر البئر صغير بحيث يمكن إهمال التخزين فى البئر.

ويوضح الشكل (١٠-٤٢) منحنى الهبوط فى سطح المياه حول البئر مع الوقت فى مثل هذه الحالة والذى يمكن أن ينقسم إلى ثلاث أجزاء مختلفة.

الجزء الأول وهو يمثل جزء صغير من فترة السحب عند البداية وهو الذى يوضح أن الطبقة غير المحصورة تعطى رد فعل وتصرف مشابه لما يحدث فى حالة الطبقات المحصورة. حيث يتم سحب المياه من الخزان عن طريق الإنضغاط الذى يحدث فيها مباشرة وكذلك التمدد الذى يحدث فى الماء نتيجة تقليل الضغط عليه بواسطة السحب وأن الصرف تحت تأثير الجاذبية لم يبدأ بعد.

وفى الحالات المناسبة يمكن حساب معامل النقل Transmissivity للطبقة الحاملة للمياه باستخدام طريقة Theis وذلك بالنسبة للجزء الأول من منحنى الهبوط فى سطح المياه مع الوقت. وهذا يمثل الدقائق الأولى من السحب من البئر وكذلك من المنطقة المجاورة للبئر ويكون التغير فى منسوب الماء حول البئر فى الدقائق الأولى محدودا.

وفى الفترة الزمنية الأولى يعطى الهبوط فى سطح المياه بالمعادلة:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_A, r/B) \qquad (10\text{-}42)$$

حيث

$$u_A = \frac{r^2 S_A}{4 KDt} \qquad (10\text{-}43)$$

ومع زيادة الفترة الزمنية فإن منحنى الهبوط مع الزمن يعطى بالمعادلة:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(u_Y, r/B) \qquad (10\text{-}44)$$

حيث

$$u_Y = \frac{r^2 S_Y}{4 KDt} \qquad (10\text{-}45)$$

ويجب ملاحظة أن المعادلات السابق ذكرها تطبق عندما تؤول النسبة (S_y / S_A) إلى ما لا نهاية أو تزيد عن ١٠٠ للأغراض العملية. أما إذا قلت النسبة عن ١٠٠ فإن الجزء الثانى من منحنى العلاقة بين الهبوط والوقت لا يكون أفقيا ولكن مع هذا فإن طريقة Boulton تعطى نتائج مناسبة ومقبولة.

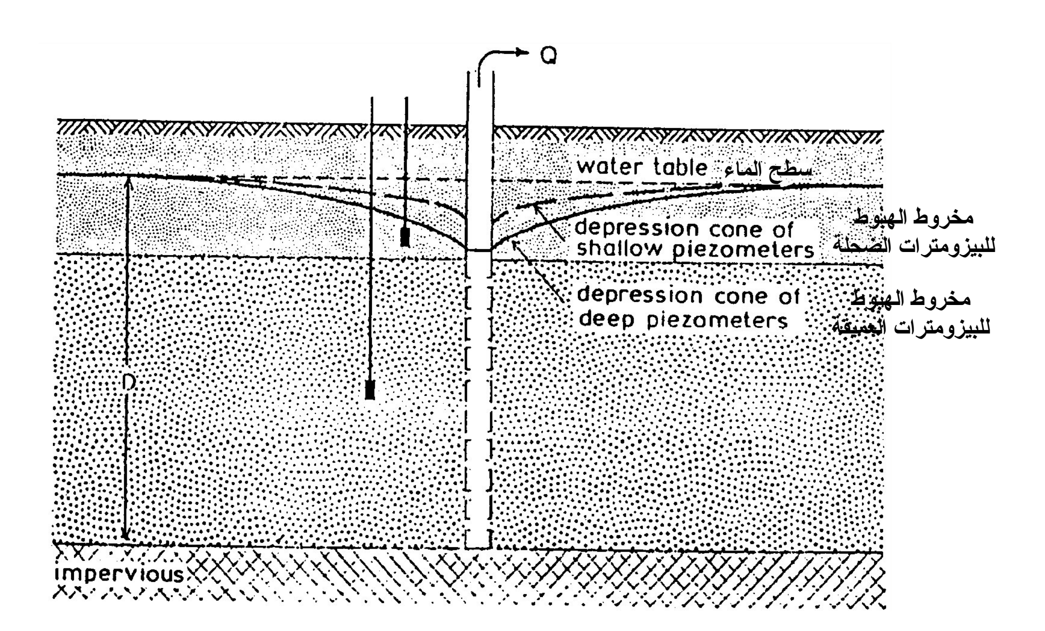
وعندما تؤول النسبة (S_y / S_A) إلى ما لا نهاية فإن الجزء الثانى يمكن أن يمثل بالمعادلة:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} K_0 \left(\frac{r}{B}\right) \qquad (10\text{-}46)$$

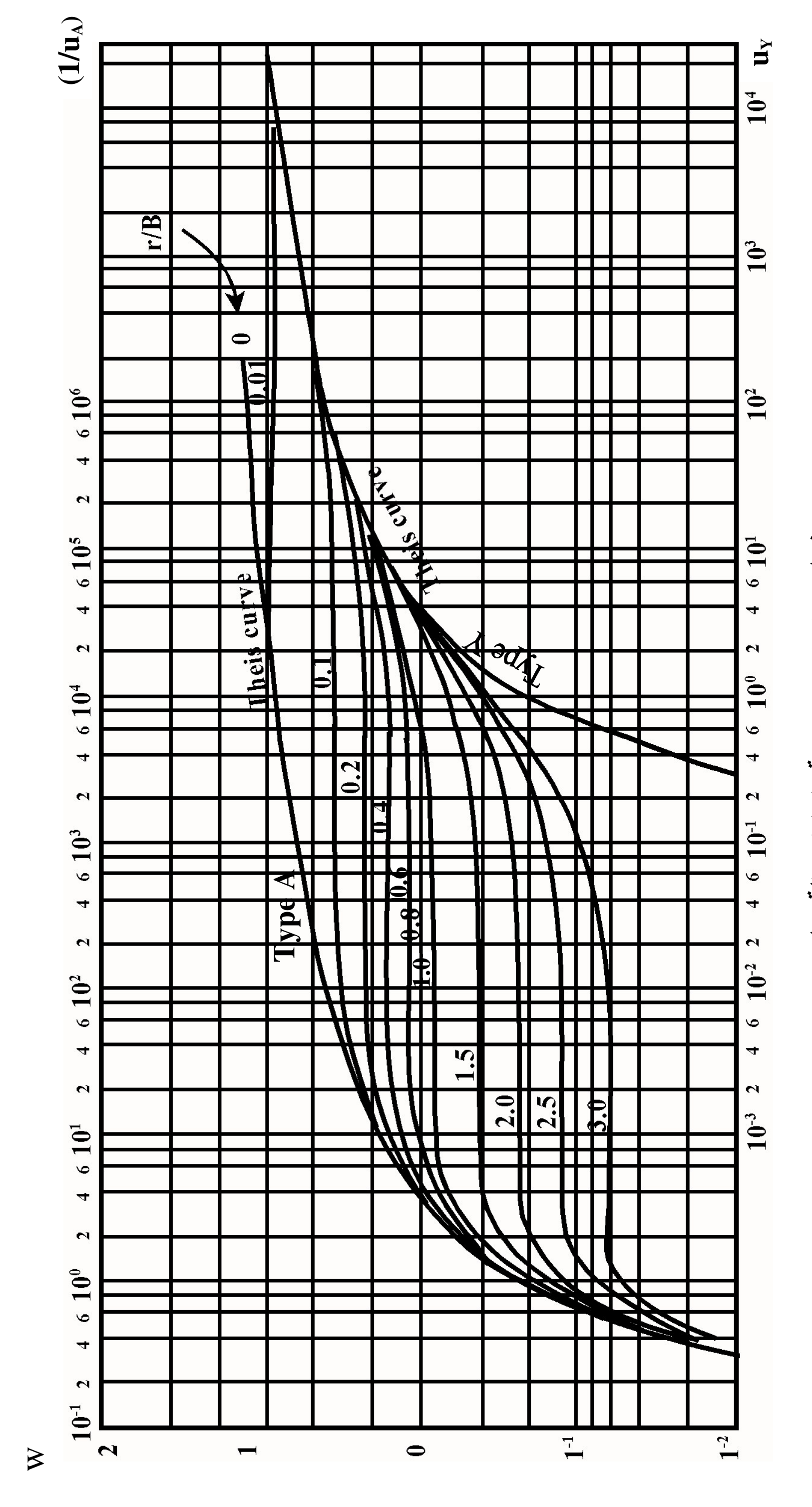
حيث K_0 (r/b) هى دالة Bessel المعدلة من الدرجة الثانية والترتيب صفر.

وعند المقارنـة بمعامل التسرب L فـى حالـة الطبقات نصف المحصورة فإن المعامل B يمكن أن يسمى بمعامل الصرف والذى يعرف :

$$B = \sqrt{\frac{KD}{\alpha S_y}} \qquad (10\text{-}47)$$



شكل (١٠-٤١) قطاع يمثل حالة السريان غير المستقر فى طبقة نصف غير محصورة
Schematic cross section of a pumped semi-unconfined aquifer



شكل (٤٢-١٠) مجموعة منحنيات دالة بولتون

Family of Boulton type curves W (u_A , r / B) versus $1/u_A$ and W (u_Y , r / B) versus $1/u_Y$ for different values r/B

سادسا : السريان المستقر فى الطبقات غير المحصورة

وتعتمد هذه الحالة على دراسات ديبوى Dupuit والتى تبنى على الاقتراحات التالية :

- سرعة السريان تتناسب مع الانحدار الهيدروليكي.
- السريان فى الاتجاه الأفقى منتظم فى كامل المنطقة وذلك فى مستوى رأسى مار بمحور البئر. مع فرض وجود ضاغط ثابت محيط بالبئر وإلا سوف لا يتأتى وجود سريان مستقر فى هذه الحالة.

كما أنه فى حالة عدم وجود مثل هذه الشروط فإن التغير الذى يحدث فى الهبوط فى سطح الماء مع الوقت يكون قليلا جدا فى حالة استمرار السحب من البئر لفترة طويلة. وفى هذه الحالة يمكن تطبيق معادلة السريان المستقر بدون حدوث أخطاء ملحوظة.

طريقة ثيم ديبوى Thiem-Dupuit

وفيها تطبق الشروط السابق ذكرها بالإضافة إلى أن :

- الطبقة الحاملة للمياه غير محصورة.
- السريان للبئر من نوع السريان المستقر.

وفى هذه الحالة يكون التصرف للطبقة غير المحصورة الموضحة بالشكل (١٠-٤٣) حسب المعادلة التالية :

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln (r_2 / r_1)} \qquad (10\text{-}48)$$

والتى يمكن تطويرها لتصبح

$$Q = \frac{2\pi KD (S'_{m1} - S'_{m2})}{\ln (r_2 / r_1)} \qquad (10\text{-}49)$$

حيث

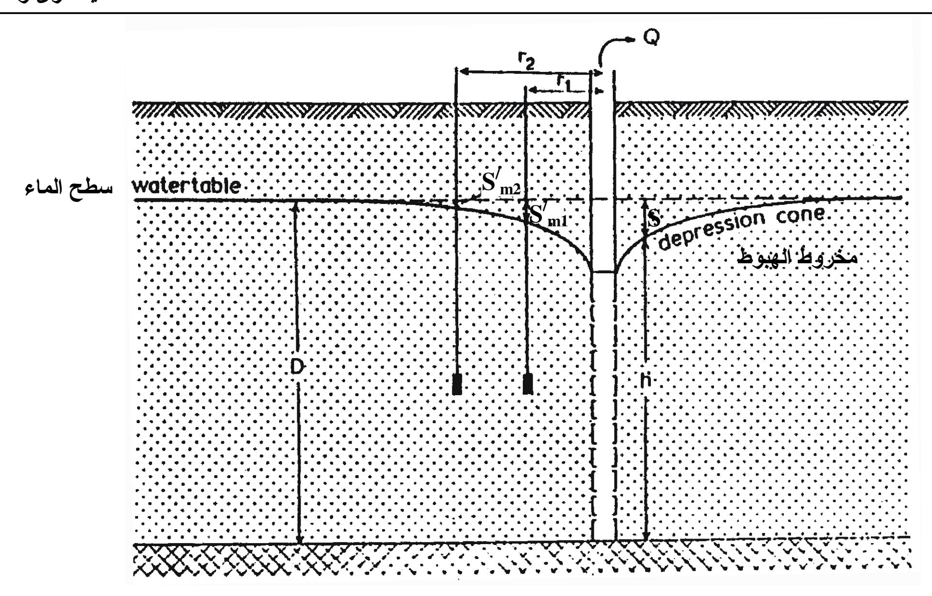
$S - (S^2 / 2D) = S'$ وهو ما يعرف بالهبوط المعدل للبئر

سابعا : السريان غير المستقر فى الطبقات غير المحصورة

فى حالة الطبقات غير المحصورة يمكن استخدام الطرق السابق ذكرها بالنسبة للطبقات المحصورة مع تحقيق الافتراضات السابق ذكرها إضافة إلى أن :

- المياه التى تسحب تؤثر مباشرة فى الهبوط فى سطح المياه وبذلك لا يكون هناك سحب متأخر
- قطر البئر من الصغر بحيث يمكن إهمال التخزين داخله وفى هذه الحالة يتم استبدال مقدار الهبوط s بالقيمة $(s' = s - s^2/2D)$.

ويجب ملاحظة أن الهبوط صغير بالمقارنة بسمك الطبقة الحاملة للمياه وألا تنتفى صحة فرض أن سمك الطبقة الحاملة للمياه ثابت.



شكل (١٠-٤٣) قطاع يمثل السريان المستقر فى طبقة غير محصورة
Schematic cross-section of pumped unconfined aquifer

١٠-٩ المراجع

1. Bouwer, Herman, ”Groundwater Hydrology”, McGraw-Hill, New York, U.S.A, (1978).

2. Campell, M.D. and Lehr, J.H., ”Water Well Technology”, McGraw-Hill, New York, U.S.A, (1972).

3. Chin, D.A., ”Water Resources Engineering”, Printice Hall, New Jensey, U.S.A, (2000).

4. Delleur, Jacques (Editor), ”The Handbook of Groundwater Engineering”. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, (1999).

5. Fowler, Lloyed (Editor), ”Operation and Maintenance of Groundwater Facilities”, ASCE Manuals and reports on engineering practice No.86, American Society of Civil Engineers, New York, USA, (1996).

6. Johnson Division, Universed Oil Products Company, “Groundwater and Wells”, St. Paul, MN, USA, (1975).

7. Kasenow, M., ”Applied Groundwater Hydrology and Well Hydraulics”, Water Resources Publications, Englewood, Colorado, USA, (1997).

8. Moss, Roscoe, “Handbook of Groundwater Development”,, Wiley Interscience Publications, New York, USA, (1990).

9. Pyne, David, “Groundwater Recharge and Wells”, Lewis Publishers, Chelsea, MI, USA, (1995).

10. US Bureau of Reclamation, ”Groundwater Manual”, United States Government Printing Office, Washington, USA, (1977).

الباب الحادى عشر
الكبارى Bridges

١١-١ مقدمة
يشتمل هذا الباب على تعريف الكبارى ومكوناتها وتصنيفها والدراسات الخاصة بها واعتبارات تصميمها وصيانتها. وتعتمد المعلومات الوارده فى الباب على المراجع المذكورة فى نهاية الباب وبصفه اساسيه على المرجع (١١-٤٢).

١١-١-١ تعريف
الكبارى هى عبارة عن أعمال إنشائية توفر ممرا لعبور مانع بدون إغلاق الطريق أسفله وهذا الممر يستخدم كطريق - خط سكه حديد - للمشاة - كقناة أو خط أنابيب والمانع المراد عبوره قد يكون نهرا - طريقا - خط سكه حديد أو واديا.

تدخل الكبارى ضمن أعمال المعابر Crossing works والتى تشمل أيضا أعمال البدالات والبرابخ والسحارات وخلافه.

١١-١-٢ مكونات الكبارى
تتكون الأجزاء الرئيسية للكبارى من الآتى :

أ- أرضية الكوبرى (Deck) والمكونة من البلاطة والكمرات والجمالونات والشكالات وغيرها.
ب- القواعد الحاملة لأرضية الكوبرى.
ج- الدعامات والأكتاف.
د- الأساسات.
هـ- مصاعد ومهابط الكوبرى لربطه بالطرق فى طرفيه.
و- الدربزينات.
ز- أعمال تهذيب النهر وأحجار الحماية وتكسية الميول عند الأكتاف.

١١-١-٣ تصنيف الكبارى
يمكن تصنيف الكبارى بطرق مختلفة كما يلى :

أ- طبقا لوظيفة الكوبرى مثل كبارى المشاة وكبارى السكة الحديد وكبارى الطرق وكبارى خطوط الأنابيب والقنوات والجسور فوق الأودية وغيرها.
ب- طبقا للمادة المستخدمة فى الإنشاء مثل الخشب والحجر والصلب والحديد والخرسانة المسلحة والخرسانة سابقة الإجهاد والكبارى المركبة وخلافه.
ج- طبقا لشكل الكوبرى مثل الكبارى ذات البلاطات والكبارى ذات الكمرات والكبارى الجمالونية والكبارى المقوسة والكبارى المعلقة.
د- طبقا لطبيعة ارتكاز الكوبرى على الدعامات مثل الكبارى بسيطة الارتكاز والكبارى المستمرة والكبارى الكابولية.
هـ- طبقا لوضع أرضية الكوبرى بالنسبة لجسم الكوبرى والتى يمكن أن تكون أعلى الكمرات الحاملة أو أسفلها أو خلالها.
و- طبقا لطريقة تنفيذ وصلات الأجزاء المختلفة لجسم الكوبرى وخاصة الكبارى المعدنية مثل الوصلات القلاووظ ووصلات اللحام.
ز- طبقا لمنسوب الطريق بالنسبة لأقصى منسوب سطح مياه النهر أسفله.

ح- طبقا لطريقة تنفيذ الخلوص الرأسى فوق منسوب سطح النهر ليفى بأغراض الملاحة.
ط- طبقا لطول مجرى الكوبرى مثل البرابخ والكبارى الثانوية والكبارى الرئيسية والكبارى ذات البحور الطويلة .
ى- طبقا للنظام الأستاتيكى للكوبرى مثل الكبارى المحددة أستاتيكيا والكبارى غير المحددة أستاتيكيا.
ك- طبقا لطبيعة واستمرارية الخدمة المطلوبة من الكوبرى مثل الكبارى الدائمة والكبارى المؤقتة والكبارى العسكرية.

١١-٢ الاستكشافات الخاصة بأعمال الكبارى

١١-٢-١ الحاجة إلى الاستكشافات

قبل إنشاء أى كوبرى فى موقع معين يكون من الضرورى الأخذ فى الاعتبار عدة عوامل منها الحاجة الملحة إلى إنشاء هذا الكوبرى ودرجة كثافة المرور الحالية والمتوقعة مستقبلا وخواص المجرى المائى وحالة التربة وكذلك الأماكن البديلة والنواحى الجمالية والتكلفة وغيرها.

والغرض من الاستكشافات هو إختيار أنسب المواقع لإنشاء الكوبرى بتكلفة إقتصادية وفى ذات الوقت تلبية الاحتياجات المطلوبة لحركة المرور وتوفير الأمان والشكل الجمالى.

ويعتمد نجاح التصميم النهائى للكوبرى على دقة المعلومات الواردة من المكلفين بعملية الاستكشاف. وتشمل البنود التالية المعلومات الأولية التى يجب تجميعها والرسومات الابتدائية التى يجب إعدادها والتفاصيل الأخرى الواجب أن يهتم بها المهندس المنوط به عمل الاستكشاف.

١١-٢-٢ المعلومات الأولية التى يجب تجميعها

يجب على المهندس المكلف بأعمال الاستكشاف لكوبرى ما أن يقوم بتجميع المعلومات التالية :
أ- أسم النهر والطريق والموقع للأماكن المحتملة لإنشاء الكوبرى.
ب- موقع أقرب علامة لشبكة المثلثات المساحية العظمى ومنسوب هذه العلامة.
ج- حجم وطبيعة المرور الحالى والمتوقع فى المستقبل على الطريق فى موقع الكوبرى.
د- البيانات الهيدروليكية المتعلقة بالنهر وتشتمل على أعلى منسوب للمياه والمنسوب السائد وأقل منسوب وهل النهر ملاحى أم غير ملاحى.
هـ- تتابع طبقات التربة فى المواقع المحتملة للكوبرى وذلك على كامل طول الكوبرى.
و- مدى الاحتياج لأعمال تهذيب النهر على نطاق كبير.
ز- مدى تعرض موقع الكوبرى لتأثير الزلازل.
ح- مدى توافر مواقع محاجر ومخازن الأسمنت والحديد والخشب قريبة لموقع الكوبرى أو سهولة نقل هذه المواد إلى الموقع.
ط- مدى توافر العمالة الماهرة وغير الماهرة لجميع الأعمال اللازمة لعملية إنشاء الكوبرى.
ى- أية تفاصيل خاصة بالكبارى المتواجدة العابرة لنفس النهر.
ك- مدى توافر مصادر الطاقة الكهربية - التليفونات والخدمات الأخرى.

١١-٢-٣ إختيار البيانات المسجلة المتاحة

عادة ما يكون هناك معلومات متاحة فى مصادر مختلفة يجب الإطلاع عليها للإستفادة منها و تشمل ما يلى :

١١-٢-٣-١ الخرائط المساحية الطبوغرافية
هذا النوع من الخرائط يعطى معلومات عن شكل المجرى المائى وعرضه كما يوضح إذا ما قورن بخرائط مساحية جديدة أو قديمة معلومات مفيدة عن ثبات المجرى من حيث إستقامته أو تعرجاته Meandering وتواجد رؤوس حجرية على جانبيه من عدمه. وتكون هذه الخرائط ذات ثلاثة أبعاد وتبين المناسيب .

١١-٢-٣-٢ الصور الجوية
تواجد مثل هذه الصور يكون مفيدا للغاية لمعرفة التغيرات التى تحدث للنهر من وقت لأخر فى موقع الكوبرى.

١١-٢-٣-٣ صور الأقمار الصناعية
تفيد هذه الصور فى حالة الحصول عليها فى معرفة التغيرات التى تحدث للنهر على فترات متقاربة وانطباعات أوضح لما يحدث فى منطقة الكوبرى المراد إنشاؤه.

١١-٢-٣-٤ حصر أعمال الصيانة للمنشآت المقامة على نفس النهر
تفيد عملية حصر أعمال الصيانة للمنشآت المقامة على نفس النهر فى إعطاء فكرة عن سلوك هذا النهر.

١١-٢-٤ الرسومات الابتدائية
يجب إعداد رسومات إبتدائية وقت إجراء الاستكشافات حيث تشتمل على مايلى :

١- خريطة إرشادية ترسم بمقياس رسم مناسب (١ - ٥٠٠٠٠) تبين الموقع المقترح للكوبرى والمواقع الأخرى البديلة التى تم استكشافها مع الطبيعة الجغرافية العامة للمنطقة والمدن الهامة القريبة.

٢- خريطة كنتورية للمجرى المائى وجوانبه بمقياس رسم مناسب (١ - ٥٠٠٠) تشمل منطقة الكوبرى ومسافة تمثل ستة أمثال عرض المجرى فى الأمام وكذلك فى الخلف وذلك للتعرف على شكل قاع المجرى وجوانبه وذلك بعمل قطاعات عرضية مكثفة على الطول المراد عمل مساحة هيدروغرافية له.

٣- قطاع عرضى للنهر عند الموقع المقترح للكوبرى بمقياس رسم (١ - ١٠٠٠) أفقيا ، (١ - ١٠٠) رأسيا تبين عليه البيانات الآتية :

أ- أقصى منسوب للمياه وأقل منسوب والمنسوب السائد.

ب- منسوب الطريق الواجب إمراره فوق هذا النهر.

ج- الخلوص اللازم لتمرير الملاحة النهرية إن وجدت.

د- تخطيط المصاعد والمهابط للكوبرى.

٤- خريطة تبين زاوية ميل الكوبرى على إتجاه التيار فى النهر فى حالة إذا ماكان غير متعامد عليه.

٥- خريطة تبين شكل التيارات السطحية لمجرى النهر فى موقع الكوبرى ومسافة أمامه وخلفه وذلك بمتابعة العوامات العائمة على سطح المياه.

١١-٣ إختيار موقع الكوبرى
عادة لا يكون هناك مجال واسع لإختيار موقع الكوبرى وخاصة بالنسبة للكبارى التى تقام فى المناطق الحضرية أما بالنسبة للكبارى العابرة للأنهار فى المناطق الريفية فيكون مجال الإختيار أوسع ويمكن حصر الإختيار الأمثل لموقع كوبرى على أى نهر فى النقاط التالية :

أ- أن يكون مجرى النهر على شكل مستقيم.

ب- أن يكون القطاع العرضى للنهر بدون دوامات وتيارات عرضية. كما يكون متزنا أى ليس به نحر ولا ترسيب وتكون أعماقه متساوية.

ج- أن يكون عرض المجرى ضيقا ذا جوانب سليمة وثابتة.
د- أن يكون جانبا المجرى أعلى من أقصى منسوب للمياه فى النهر.
هـ أن يكون قاع المجرى صخريا أو صلبا.
و- أن تكون المصاعد والمهابط إقتصادية التكاليف.
ز- أن يكون قريبا من الطريق الذى يرتبط به الكوبرى.
ح- ألا يحتاج إلى أعمال تهذيب مكلفة.
ط- تجنب أعمال الإنشاء فى حالة تواجد المياه وكذلك تجنب الإفراط فى الأعمال التى تؤثر فى حركة وإتجاهات المياه وخلق دوامات وسرعات عالية.
ى- أن يكون الموقع خاليا من تكاثر الحشائش المائية.
ك- أن تكون حركة الرسوبيات أمام الموقع وخلفه متساوية.

ولإختيار موقع الكوبرى يجب فحص عدد من المواقع البديلة والتى تتوافر فيها غالبية النقاط السابقة حتى يمكن الإستقرار على الموقع الذى يلبى احتياجات الكوبرى المراد إنشاؤه بأقل تكلفة ممكنة.

ويستحسن تخطيط الكوبرى ليكون متعامدا مع النهر ما أمكن ولكن أحيانا يتم تخطيط كوبرى مائل على محور النهر وذلك لتفادى التكاليف العالية لنزع الملكية أو الإنحناءات الحادة لمصاعد ومهابط الكوبرى وعادة ما يؤدى الكوبرى المائل إلى صعوبات فى تصميم وإنشاء وصيانة الكوبرى.

وبعد إختيار الموقع المناسب لعبور الكوبرى على النهر فإنه يجب البدء فى عمل مساحة هيدروجرافية وهيدروليكية بغرض الحصول على البيانات الضرورية لحساب عرض فتحات الكوبرى وعمق النحر الذى يتعرض له قاع المجرى والقوى المائية المؤثرة على دعامات الكوبرى.

١١-٣-١ المساحة الهيدروجرافية

تشمل أخذ القطاعات العرضية على مجرى النهر على مسافات ٠,٥ ، ١ ، ٢ ، ٤ ، ٦ ، ١٢ مرة عرض النهر أمام الكوبرى وعلى مسافات ٠,٥ ، ١ ، ٢ ، ٤ عرض النهر خلف الكوبرى ثم عمل الخريطة الكنتورية التى تشمل قاع النهر بجوانبه حتى منسوب أعلى من أقصى منسوب للمياه فى الموقع ويجب معرفة التدرج الحبيبى لمواد القاع فى أربع أماكن على الأقل فى القطاع المار بموقع الكوبرى وفى مكانين فى القطاعين الواقعين على مسافة ٠,٥ ، ١ عرض النهر أمام الكوبرى.

١١-٣-٢ المساحة الهيدروليكية

تتضمن القياسات التالية :

أ- قياس التصرف المار بالمجرى المائى بطريقة المساحة x السرعة ويمكن تحديد مساحة القطاع عن طريق إستخدام جهاز الجس الصوتى كما يمكن قياس سرعات المياه فى مواقع رأسية لا تقل عن عشر مواقع فى القطاع على أن تقاس السرعات فى ثلاثة نقاط بكل موقع رأسى وهى ٠,٢ ، ٠,٦ ، ٠,٨ عمق المياه من السطح وذلك بإستخدام جهاز الكرنتميتر ويمكن الحصول على متوسط السرعة فى القطاع الرأسى $V_{(aver)}$ بإستخدام المعادلة التالية :

$$V_{(aver)} = \frac{\frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} + V_{0.6}}{2} \qquad (11\text{-}1)$$

ب- قياس المواد العالقة وذلك فى نقاط قياس السرعات.
ج- قياس المواد المتحركة على القاع بالأجهزة الخاصة بذلك.

د- رسم المسارات الناتجة عن رمى عوامات فى النهر فى ستة مواقع موزعة على كامل عرض النهر تغطى مسافات كافية أمام وخلف الموقع.
هـ- قياس انحدار سطح المياه للتصرفات المختلفة بالدقة الواجبة.
و- أخذ عينات من قاع المجرى.

١١-٣-٣ الاعتبارات الهيدروليكية الأخرى

١١-٣-٣-١ مقدمة

تختلف الأنهار عادة من مكان إلى أخر والنهر نفسه يختلف من موقع إلى موقع من حيث العرض والعمق والانحدار الهيدروليكى وخلافه ومن ثم يصعب وضع نظام عام للكبارى يطبق فى كل الأحوال بل لابد من أن تدرس كل حالة على حدة بغرض عمل التصميم المناسب.

١١-٣-٣-٢ أنواع الأنهار

يجب الأخذ فى الاعتبار نوع النهر المراد إنشاء كوبرى عليه من حيث إستقامته أو تعرجاته أو تعدد تفريعاته وكذلك من حيث قيمة التصرف المار به (صغير - متوسط - كبير) علاوة على قياس عمر النهر فهناك نهر شاب أو فى مرحلة النضج أو مرحلة الشيخوخة وهناك وديان سيلية ذات سرعات عالية وجريان لفترات قصيرة.

١١-٣-٣-٣ خواص الأنهار

من الأهمية معرفة ما إذا كان هذا النهر مستقرا أو غير مستقر فمثلا هناك أنهار لها :
١- قاع رملى وجوانب رملية.
٢- قاع رملى وجوانب حجرية.
٣- قاع رملى وجوانب طينية متماسكة.
٤- قاع وجوانب طميية أو طينية.
٥- قاع مكون من تربة زلطية وما شابه ذلك.

ومن ذلك نرى أن أى نوع من الأنواع السابق ذكرها يتصرف بطريقة معينة تعتمد على خواص المواد الموجودة فى القاع والجوانب.

١١-٣-٣-٤ مورفولوجية الأنهار

عادة ما تكون الأنهار ذات قاع رسوبى حيث تشكل قطاعاتها طبيعيا دون تدخل من الإنسان بحيث يتلاءم قطاعها المائى مع التصرف المار به وبذات الانحدار الطبيعى وتشكل قاعها بالتموجات المختلفة التى تتلاءم مع هذه التصرفات. وهناك ثلاثة أنواع من الأنهار كما سبق ذكره فى بند ١١-٣-٣-٢إما مستقيمة أو متعرجة أو متعددة الأفرع.

فالنهر المستقيم نادرا ما يحدث لمسافة أكثر من ١٠ أمثال عرض المجرى المائى.

أما النهر المتعرج فهو واسع الانتشار ومن خصائصه أن قطاعه لا يتغير كثيرا ويمكن الاستدلال عن أبعاده من إستخدام المعادلات التالية:

$$L_m = 65\ Q_D^{0.5} \qquad (11\text{-}2a)$$

$$B_m = 2.86\ L_m \qquad (11\text{-}2b)$$

حيث

L_m = هو طول التعرج بالمتر

Q_D = هو التصرف السائد م^3 / ث

B_m = هو عرض التعرج بالمتر

أما النهر ذو الأفرع المتعددة فعادة ما يكون غير مستقر وذلك لكونه يمد بكم هائل من الرسوبيات أكبر بكثير مما يتحمله القطاع المائى ومن ثم فإن المواد المترسبة تؤدى إلى زيادة انحدار سطح المياه لتسمح بتحريك كميات كبيرة من المواد مع التيار المار. والحواجز الرسوبية (الجزر) المتكونة غالبا ما تؤدى إلى عكس إتجاه التيار مما يؤدى إلى تغيرات فى المجرى المائى من وقت لأخر.

وهناك عدد من الحالات للتغيرات التى تحدث للنهر ومن ذلك :

الحالة الأولى

عند تواجد كوبرى على مجرى مائى ظل منسوب المياه فيه منخفضا لمدة طويلة فإن التصرفات تشكل مجرى صغيرا داخل المجرى الكبير. فإذا ما تصادف ومر هذا المجرى الجديد بإحدى دعامات الكوبرى فإنه يشكل خطرا كبيرا حيث أن النحر الناتج عن هذه القناة الصغيرة أكبر من نظيره فى القناة الكبيرة.

الحالة الثانية

عند تواجد كوبرى على مجرى مائى ويكون هناك منخفض خلف مكان الكوبرى فإن المجرى يقوم بتعديل مجراه ويعمل على تشكيل القاع مما يزيد من سرعة المياه وبالتالى زيادة معدل نقل المواد وزيادة النحر وهذا يؤدى إلى عدم إستقرار مجرى النهر وانهيار جوانبه وبالتالى يؤثر على الفرعيات التى تصب فى المجرى المائى.

الحالة الثالثة

عند تواجد نهر يصب فيه أحد الأفرع والذى عادة ما يكون انحدار قاعه كبيرا مما يعمل على حمل كميات رسوبية تقوم بتكوين الجزر فى النهر وزيادة السرعات وزيادة النحر وتهايل الجوانب مما يعطى انطباعا لتفادى إختيار مثل هذا الموقع لإنشاء كوبرى على النهر.

الحالة الرابعة

عند تهذيب المجرى المائى ليصبح مستقيما بدلا من أن يكون متعرجا فإن ذلك يزيد من انحدار قاع المجرى والسرعة وحمل المواد ويؤثر على سلامة الجوانب وهذا بدوره يؤثر على الموقع المراد إنشاء الكوبرى فيه.

الحالة الخامسة

عند إنشاء كوبرى أمام سد من السدود فإنه يحدث ترسيب أمام هذا السد وهذا بدوره يؤثر على إرتفاع القاع وتغيير فى مناسيب المياه الأمر الذى يخشى منه صعوبة تسيير المراكب مع وضع الكوبرى فى هذه المنطقة.

الحالة السادسة

عند إنشاء كوبرى خلف سد من السدود فإنه يحدث عادة ترسيب أمام هذا السد ونحر خلفه مما يؤثر على سلامة الجوانب وكذلك سلامة الكوبرى نفسه.

الحالة السابعة
عند إنشاء الكوبرى بين سدين أحدهما يحدث نحرا خلفه والآخر يحدث إطماء أمامه فيتطلب الأمر دراسة الموقع دراسة مستفيضة بالنماذج الحسابية لحركة الرسوبيات بالمنطقة.

١١-٣-٤ تأثير الكبارى على توازن النهر
بناء أى منشأ على نهر أو سهل فيضى يؤثر على السرعات وإتجاه التيار وهذا بدوره يؤدى إلى تغير فى مورفولوجية النهر وأبعاد القناة والعلاقة بين منسوب المياه والتصرف. لذلك لابد من مراعاة أن تعود القطاعات كما كانت قبل إنشاء الكوبرى لضمان توازن حالة المجرى فى منطقة الكوبرى.

١١-٣-٤-١ الأبعاد الهيدروليكية لقناه النهر
الأبعاد الهيدروليكية لقناة النهر هى عرض وعمق وشكل القطاع والانحدار وتخطيط القناة. وهى تعتمد على عدد من العوامل وهى التصرف وخصائص مواد القاع والجوانب وكمية الرسوبيات المنقولة بواسطة القناة وقدرة القناة على نقل مثل هذه الكمية من المواد القادمة من أعالى النهر. وعموما ليس هناك طريقة لحساب أبعاد القنوات والتى يمكن تطبيقها لجميع أنواع الأنهار ولكن هناك طرق وضعية مختلفة يمكن إستخدامها وكل طريقة تعمل فى حدود خصائص تربة معينة.

ويمكن تلخيص أهم هذه الطرق لحساب الأبعاد الهيدروليكية لقناة مستقرة أستاتيكيا أو ديناميكيا. مع الآخذ فى الاعتبار أن المعادلات التى سوف يتم ذكرها لا تغطى كل الحالات.

قنوات ذات قاع رملى
المعادلات التالية أخذت من أعمال Blench

$$B = 14\, Q^{0.5}\, D_{50}^{0.25}\, F_s^{-0.5} \qquad (11\text{-}3a)$$

$$Y = 0.38\, Q^{0.67}\, D_{50}^{-0.17} \qquad (11\text{-}3b)$$

حيث
B = متوسط عرض القناة
Y = متوسط عمق القناة
Q = التصرف المار بالقناة وعادة ما يفرض أنه التصرف الذى يملأ القناة أو تصرف الطفح
D_{50} = متوسط أقطار حبيبات القاع
F_s = هو العامل الجانبى لوصف قوة صلادة الجوانب ويؤخذ (رمل جيرى) $F_s = 0.1$ و(طمى طينى جيرى) $F_s = 0.2$ و(جوانب متماسكة) $F_s = 0.3$

قنوات ذات قاع زلطى
المعادلات التالية أخذت عن بحث قام بعمله Kellerhals

$$B = 3.26\, Q^{0.5} \qquad (11\text{-}4a)$$

$$Y = 0.47\, q^{0.8}\, D_{90}^{-0.12} \qquad (11\text{-}4b)$$

حيث q = التصرف لكل وحدة عرضية من القناة (Q / B)
D_{90} = قطر المنخل الذى تقل عنه أقطار ٩٠% من حبيبات القاع
B, Y, Q قد تم تعريفها من قبل.

قنوات ذات قاع متماسك

تتولد مقاومة التربة غير المتماسكة للنحر (Scour) أساسا نتيجة الوزن المغمور للحبيبات. أما بالنسبة لمقاومة التربة المتماسكة فإن الموضوع يعتبر أكثر تعقيدا لأن مقاومة النحر تعتمد على الخواص الفيزوكيميائية والكثافة وخواص المياه. وعلى هذا فإن الطريقة التى يمكن أن يعتمد على نتائجها للتنبؤ بالنحر (Scour) هى معرفة خواص التربة وبعد ذلك إنشاء نموذج معملى.

ويعطى جدول رقم (١١-١) معلومات تساعد فى التنبؤ بالعمق المتوسط للمياه فى القنوات ذات القاع المتماسك معتمدا على نسبة الفراغات والتى تعرف على أنها النسبة بين حجم الفراغات إلى حجم المواد الصلبة فى كتلة التربة.

جدول (١١-١) الخواص الفيزيقية للطين

نسبة الفراغات	٢ - ١,٢	١,٢ - ٠,٦	٠,٦ - ٠,٣	٠,٣ - ٠,٢
الكثافة الكلية الجافة كجم /م٣	٨٨٠ - ١٢٠٠	١٢٠٠ - ١٦٥٠	١٦٥٠ - ٢٠٣٠	٢٠٣٠ - ٢٢١٠
الكثافة الكلية المشبعة كجم/م٣ (Saturated bulk density)	١٥٥٠ - ١٧٤٠	١٧٤٠ - ٢٠٣٠	٢٠٣٠ - ٢٢٧٠	٢٢٧٠ - ٢٣٧٠
نوع التربة	إجهاد السحب الحرج نيوتن / م٢ (Critical tractive stress τ_c)			
رمل طينى	١,٩	٧,٥	١٥,٧	٣٠,٢
طين ثقيل (Fat clay)	١,٥	٦,٧	١٤,٦	٢٧,٠
طين	١,٢	٥,٩	١٣,٥	٢٥,٤
طين ضعيف (Lean clay)	١,٠	٤,٦	١٠,٢	١٦,٨

ويمكن حساب عمق المياه فى الترعة بفرض أن النحر (Scour) سوف يحدث إلى أن يصل العمق إلى قيمة عندها يكون إجهاد السحب (Tractive stress) على القاع يساوى إجهاد السحب الحرج (Critical tractive stress) ومن ثم :

$$Y = 51.4\ n^{0.86}\ q^{0.86}\ \tau_c^{-0.43} \qquad (11\text{-}5)$$

حيث

Y = عمق المياه المتوسط بالمتر

n = معاملماننج للخشونة (Manning's coefficient)

q = التصرف لوحدة العرض م٣ / ث

τ_c = إجهاد السحب الحرج (Critical tractive stress) الذى يسبب النحر (Scour) نيوتن/ م٢

أكبر عمق للترعة

المعـادلات السـابقة تمكننا من حساب العمق المتوسط للمياه فى الترعة Y ولكن أقصـى عمق يمكن أن يمر بالترعة يمكن أن يستنتج بواسطة ضرب العمق المتوسط فى معامل تجريبى. هذا المعامل قد أستنتج بواسطة (Lacey) ومعطى فى جدول رقم (١١-٢) وقد أقترح Nill أن يؤخذ المعامل الخاص بالأحباس المستقيمة ١,٥ بدلا من ١,٢٥ حيث يوجد على القاع كثبان متحركة.

جدول (١١-٢) عامل الضرب لأقصى عمق للترعة

الموقع	عامل الضرب
حبس مستقيم من ترعة	١,٢٥
إنحناء معتدل	١,٥٠
إنحناء شديد	١,٧٥
لفة حادة عمودية	٢,٥٠

١١-٣-٤-٢ المجرى المائى الخطى

عندما يكـون المجـرى المائـى المـراد عبوره عبارة عن قناة صـناعية للـرى أو الملاحـة وعـندما تكـون الضفاف محددة بعناية لمجرى طبيعى فإن المجرى المائى الخطى يجب أن يكون هو العرض الكامل للقناة أو للمجرى.

وبالنسبة للمجرى الغرينـى غير محدد الضفاف فإن المجرى المائى الخطى يجب حسابه من معادلة لاسى Lacey التالية :

$$B = C\sqrt{Q} \qquad (11\text{-}6)$$

حيث

B = هو عرض المجرى المائى الخطى بالمتر

Q = التصرف التصميمى الأقصى بالمتر المكعب / ثانية

C = ثابت عادة ما يؤخذ مساويا ٤,٨ ولكنه قد يتغير بين ٤,٥ إلى ٦,٣ تبعا للظروف المحلية

ومن غير المرغوب فيه تخفيض عرض المجرى المائـى ليكون أقل من القيمة المحددة بالنظام المائى المعمول بـه. وإذا حدث هذا التخفيض فإن اهتماما خاصـا يجب أن يـوجه إلى تدفق وسرعة المياه أسفل الكوبرى حيث أنـه بإستخدام مجرى مائى ضيق فإن السرعة ستزيد حتما مصحوبة بعمق أكبر للنحر مما يتطلب أساسـات أعمق. وعلـى هذا فـإن أى توفير ممكن فـى عرض المجـرى المائى سوف يقابل بزيادة مصاريف الأساسات الأعمق وأعمال الحماية.

وتدفق المـاء عند موقـع الكوبـرى يحـدث عنـه إرتفـاع فـى سطح المياه نتيجة اعتراض دعامات الكوبرى للمجرى المائى. ويمكن حساب هذا الإرتفاع من المعادلة التالية :

$$X = \frac{V^2}{2g} \left[\frac{B^2}{C^2 B_1^2} - 1 \right] \qquad (11\text{-}7)$$

حيث

X = هو إرتفاع منسوب المياه (Afflux) بسبب المنشأ المائى (الكوبرى)
V = سرعة التيار المار فى المجرى
g = عجلة الجاذبية الأرضية
B = عرض المجرى المائى عند أقصى منسوب للمياه
B_1 = عرض المجرى المائى عند منسوب قاع المجرى
C = معامل التصرف أسفل الكوبرى ويؤخذ ٠,٧ للمدخل الحاد و ٠,٩ للمدخل على شكل الجرس

ويجب أن لا يزيد إرتفاع منسوب المياه Afflux عن ١٠٠ مم حيث يؤدى هذا بدوره إلى زيادة النحر وبالتالى الحاجة إلى أساسات أعمق. ويتوقف منسوب الطريق على أقصى منسوب للمياه فى المجرى مضافا إليه مدى إرتفاع منسوب الماء Afflux (x) .

ويجب مراعاة أن تكون سرعة التيار المائى عند موقع الكوبرى أقل من السرعة الآمنة المسموح بها طبقا لطبيعة مادة قاع المجرى. وتعتبر السرعات التالية استرشادية فى هذا المجال.

جدول (١١-٣)

مادة قاع المجرى	السرعة الآمنة المسموح بها للتيار المائى عند موقع الكوبرى
طين وزلط أو رمل ناعم	حتى ٠,٥ متر / ثانية
رمل حرش	من ٠,٥ إلى ١,٠ متر / ثانية
زلط رفيع ، طين رفيع أو طين متماسك	من ١,٠ إلى ١,٥ متر / ثانية
زلط كبير ، تكوينات صخرية	من ١,٥ إلى ٢,٥ متر / ثانية
حجارة ، صخر	من ٢,٥ إلى ٥,٠ متر / ثانية

١١-٣-٥ البحر الإقتصادى للكوبرى

البحر الإقتصادى الأمثل للكوبرى هو ذلك الذى يتساوى عنده تكلفة الدعائم والأساسات بتكلفة جسم الكوبرى. ويمكن التحقق من هذا الشرط بالطريقة الآتية :

بافتراض أن A = تكاليف المصاعد والمهابط
B = تكلفة عدد ٢ كتف شاملة الأساسات
L = المجرى المائى الخطى الكلى
l = طول البحر
n = عدد البحور
p = تكلفة دعامة واحدة شاملة الأساسات

c = التكلفة الكلية للكوبرى

وبافتراض أن تكلفة جسم الكوبرى لبحر واحد تتناسب مع مربع طول البحر فإن التكلفة الكلية لجسم الكوبرى تكون $n\ k\ l^2$ حيث k هو ثابت التناسب.

وتكلفة أرضية الكوبرى والقضبان وخلافه تتناسب مع الطول الكلى للكوبرى ويمكن اعتبارها مساوية $k^{/}\ L$ حيث $k^{/}$ هو ثابت أخر للتناسب. وعلى هذا فإن التكلفة الكلية للكوبرى يمكن حسابها :

$$c = A + B + (n - l)\ P + n\ k\ \ell^2 + k^{/}\ L \qquad (11\text{-}8)$$

وللحصول على أقل تكلفة فيجب مفاضلة المعادلة السابقة بالنسبة لطول البحر ومساواة التفاضل بالصفر

$$dc / d\ell = 0$$

وباعتبار أن $n = L / 1$
فإنه ينتج

$$P = k\ \ell^2$$

وعلى ذلك وللحصول على بحر إقتصادى فإن تكلفة جسم الكوبرى لبحر واحد يجب أن تكون مساوية لتكلفة الدعائم والأساسات لنفس البحر. ويكون البحر الإقتصادى l_e مساويا :

$$l_e = \sqrt{p / k} \qquad (11\text{-}9)$$

ويمكن تقدير قيم k, p كمتوسط لمجموعة من أطوال البحر الممكنة

١١-٣-٦ مواقع الدعائم والأكتاف

يتم تحديد مواقع الدعائم والأكتاف بالإستخدام الأمثل لظروف الأساسات المتاحة وبتحقيق البحر الإقتصادى الأمثل ما أمكن. وإذا اعتبرت الاحتياجات الملاحية والجمالية فى التخطيط فإنه يمكن تعديل البحور بما يناسب هذه الاحتياجات. وكقاعدة فإنه يجب تقليل عدد الدعائم باعتبارها عوائق للتيار المائى.. وبالنسبة للكبارى الرئيسية فإن تحديد مواقع الدعامات والأكتاف يحتاج إلى المزيد من الدراسات ويستحسن أن تكون النماذج هيدروليكية. ويجب أن يكون تخطيط وضع الدعامات والأكتاف موازيا لاتجاه التيار فى المجرى ما أمكن وإذا ما حدث تغير مؤقت فى إتجاه وسرعة تيار المجرى فإن أعمال حماية مناسبة يجب اتخاذها لحماية الدعامات والأساسات ضد التأثيرات الضارة على اتزان الكوبرى وسلامته.

١١-٣-٧ الخلوص الرأسى فوق أعلى منسوب للفيضان

بالنسبة للكبارى المرتفعة فإن خلوصا رأسيا يجب تركه بين أقصى منسوب للمياه وأوطى نقطة فى جسم الكوبرى. وهذا الخلوص مطلوب لتفادى أى خطأ ممكن فى تقدير أقصى منسوب للمياه والتصرف التصميمى. وهذا الخلوص يسمح أيضا بعبور الحطام الطافى أسفل الكوبرى دون حدوث أضرار لجسم الكوبرى. ولذلك فإنه من المنطقى زيادة قيمة هذا الخلوص مع زيادة حجم التصرف كما يوضحه الجدول الاسترشادى التالى :

جدول (١١-٤) مرجع (١١-٤٢)

التصرف م^{3} / ث	الخلوص الرأسى الأدنى (مم) فوق أعلى منسوب للفيضان
أقل من ٠,٣	١٥٠
من ٠,٣١ إلى ٣,٠٠	٤٥٠
من ٣,١٠ إلى ٣٠,٠٠	٦٠٠
من ٣١ إلى ٣٠٠	٩٠٠
من ٣٠١ إلى ٣٠٠٠	١٢٠٠
أكثر من ٣٠٠٠	١٥٠٠

وبصفة عامة يجب زيادة الخلوص لعدم تراكم الحشائش على فتحات الكوبرى والسماح بمرور السفن. وبالنسبة للكبارى المقوسة فإن الخلوص أسفل قمة القوس يجب ألا يقل عن ١ / ١٠ من أقصى عمق للمياه مضافا إليه ١ / ٣ إرتفاع القوس. وبالنسبة للكبارى ذات الارتكازات المعدنية فإن الخلوص بين قاعدة الارتكاز وأعلى منسوب للفيضان مضافا إليه (Afflux) يجب ألا يقل عن ٥٠٠ مم. ويجب عدم الخلط بين الخلوص الرأسى والرصيف الحر Freeboard حيث يختص الأخير بالمصاعد والمهابط وهو عبارة عن الفرق بين أعلى منسوب للفيضان شاملا Afflux ومنسوب تكوين جسر الطريق على المهابط والمصاعد. وبالنسبة للكبارى المرتفعة فإن الرصيف الحر يجب ألا يقل عن ٦٠٠ مم.

١١-٣-٨ استكشاف التربة

الاستكشاف الجيد للتربة فى المواقع المقترحة لتنفيذ كوبرى من العناصر الأساسية التى تساهم فى الإختيار السليم لأماكن وطبيعة أساسات الكوبرى ويؤدى أيضا إلى سلامة تقدير تكاليف إنشاء هذه الأساسات وتنفيذها بطريقة صحيحة لأن أى عيوب فى منشأ الكوبرى تعزى إلى أخطاء فى استكشاف التربة يكون من الصعوبة بمكان إصلاحها. ويجب أن يتم عمل جسات على كامل طول الكوبرى ومصاعده ومهابطه على مسافات مناسبة شاملة المواقع المحتملة للدعامات والأكتاف ما أمكن. ويتم تنفيذ هذه الجسات وإعداد التقارير الخاصة بها طبقا لما هو وارد فى بنود الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

١١-٣-٩ عمق النحر

النحر فى قاع المجرى يحدث نتيجة تجاوز سرعة التيار المائى السرعة المحددة التى تتحملها جزيئات مادة القاع أو تواجد دوامات أو أى انحرافات لإتجاه التيار وتواجد سرعات عرضية. ويزداد النحر حرجا عند الدعامات وعند إنحناءاتها. ويجب قياس عمق النحر نسبة إلى المنشآت القائمة بالقرب من الموقع المقترح للكوبرى إذا أمكن ذلك. ويجب زيادة هذا العمق للنحر عند التصميم حيث أن التصرف التصميمى دائما ما يكون أكبر من تصرف الفيضان مما يؤدى إلى زيادة النحر بالإضافة إلى زيادة سرعة التيار لاعتراضه بدعامات الكوبرى الذى سوف يتم إنشاؤه. وإن لم يكن من الممكن حساب عمق النحر بطريقة عملية فيمكن حسابه من المعادلة التالية وذلك للمجارى الطبيعية الطينية القاع :

$$d = 0.473\ (Q / f)^{0.33} \qquad (11\text{-}10)$$

حيث

d = هو عمق النحر العادى أسفل أعلى منسوب للفيضان بالمتر

Q = التصرف التصميمى بالمتر المكعب / ثانية

f = هو معامل لاسى لعينة ممثلة لتربة القاع ويحسب على أساس ١,٧٦ مرة الجذر التربيعى لحجم حبيبات التربة بالمليمتر (Lacey's silt factor)

ويعطى الجدول التالى قيمة هذا المعامل لأنواع مختلفة من تربة القاع :

جدول (١١-٥) - مرجع (١١-٤٢)

نوع تربة القاع	حجم الحبيبات (مم)	معامل لاسى (f)
طمى	٠,٠٥	٠,٤
	٠,١٢	٠,٦
	٠,٢٣	٠,٨
	٠,٣٢	١,٠
رمل	٠,٥٠	١,٢
	٠,٧٣	١,٥
	١,٢٩	٢,٠
زلط	-	٩,٠

وفى حالة أن يكون المجرى المائى الخطى الفعال (L) أقل من عرض المجرى (w) فيجب زيادة عمق النحر (d) المحسوب من المعادلة (١١-١٠) بضربه فى المعامل $(\frac{W}{L})^{0.67}$ ، ويمكن اعتبار أقصى عمق للنحر طبقا لطبيعة المجرى كم يلى :

جدول (١١-٦) – مرجع (١١-٤٢)

أ- فى الأجزاء المستقيمة	d x ١,٢٧
ب- فى إنحناء معتدل	d x ١,٥٠
ج- فى إنحناء شديد	d x ١,٧٥
د- فى إنحناء بزاوية قائمة	d x ٢,٠٠
هـ- عند أنوف الدعامات	d x ٢,٠٠
و- عند الأنوف العليا (Guide bunds)	d x ٢,٧٥

وأقل عمق للأساسات أسفل أعلى منسوب للفيضان يجب أن يكون ١,٣٣ d x بالنسبة لطبقات التربة المعرضة للنحت. وإذا كان النهر ذا قاع غير قابل للخضوع بسهولة لتأثير نحر الفيضان فإن أقصى عمق للنحر يتم تحديده بالملاحظة والقياس ولا يتم حسابه عن طريق الحسابات السابقة.

كما يمكن الاسترشاد بالمعادلات التالية لحساب عمق النحر :

١- معادلة بلينش Blench (1965)

$$H_s / Y_r = 1.8 + (a / Y_r)^{0.25} \qquad (11\text{-}11)$$

حيث

H_s = عمق النحر من سطح الماء

$Y_r = 1.48(\frac{g^2}{F_b})^{1.5}$

F_b = متوسط شدة التصرف م٣ / ث

a = عرض الدعامة

٢- معادلة فريهليه Forehlich (1987)

$$\frac{Y_s}{a} = 0.32\, k_1 \left(\frac{a^1}{a}\right)^{0.62} \left(\frac{Y_1}{a}\right)^{0.46} (F_{ra})^{0.20} \left(\frac{a}{D_{50}}\right)^{0.08} + 1.0 \qquad (11\text{-}12)$$

حيث

k_1 = معامل حسب نوع الدعامة

= ١,٢ للدعامة ذات الأنف المربع

= ١,٠ للدعامة ذات الأنف المستدير

= ٠,٧ للدعامة ذات الأنف المدبب (sharp nose)

a^1 = عرض الدعامة مسقطا على الإتجاه المتعامد على إتجاه التصرف

a = عرض الدعامة

Y_1 = عمق التصرف

$F_{ra} = \frac{V_1}{\sqrt{g\,Y_1}}$ حيث V_1 = سرعة التصرف

D_{50} = القطر المتوسط لمادة القاع

٣- معادل أروناشالام Arounachalam (1965)

$$\frac{Y_s}{Y_a} = 1.95 \left(\frac{b}{Y_a}\right)^{1/6} - 1 \qquad (11\text{-}13)$$

حيث

Y_s = عمق النحر تحت منسوب القاع (متر)

b = عرض الدعامة (متر)

$$1.33\sqrt{q^2/f} = Y_a$$

q = متوسط شدة التصرف (م^٣ / ث)

$1.76\sqrt{d}$ = f = معامل الإطماء

d = متوسط قطر مادة القاع (مم)

١١-٣-١٠ إختيار نوع الكوبرى

إختيار النوع المناسب للكوبرى وتخطيط ملامحه الرئيسية يمثل قرارا قاطعا يجب اتخاذه من جانب مهندس الكبارى والذى يجب عليه اعتبار جميع المعلومات الأولية التى تم تجميعها من الاستكشافات المفصلة قبل أن يصل إلى قرار.

ويجب أن يكون النوع المختار من الكبارى هو الأكثر مناسبة ليسمح بحركة المرور المطلوبة والأكثر متانة ليتحمل الأحمال الفعلية الواقعة عليه والأكثر إقتصادا وفى نفس الوقت الأكثر مراعاة للناحية الجمالية.

وفيما يلى بعض العوامل المؤثرة على إختيار نوع الكوبرى وملامحه الرئيسية :

١- الحاجة إلى تخفيض التكلفة الكلية للإنشاء مما قد يؤدى إلى دمج احتياجات مرور المشاة والسكة الحديد فى كوبرى واحد خاصة بالنسبة للكبارى ذات العروض الكبيرة جدا.
٢- الاحتياج لخلوص ملاحى كبير قد يملى إختيار أنواع خاصة من الكبارى مثل الكبارى المقوسة ، الكبارى الكابولية ، الكبارى الملجمة أو الكبارى المعلقة.
٣- المصاعد والمهابط الطولية أو العالية قد تكون عالية التكاليف بالنسبة لخط سكة حديد ذى حركة مرور منخفضة مما قد يدفع إلى إختيار كوبرى ذى منسوب منخفض مع بحر متحرك ليلائم حركة الملاحة.
٤- الحاجة إلى كوبرى ذى منسوب عالى مع حركة مرور غير منقطعة مع الاحتياج لتقليل عدد الدعائم قد يحتم إختيار كوبرى كابولى أو كوبرى ملجم أو مجموعة من الجمالونات بسيطة الارتكاز.
٥- طبيعة الظروف المناخية والبيئة قد تحتم إستخدام أنواع من الكبارى وتستبعد أنواعا أخرى. مثلا الكبارى المعدنية قد لا تستخدم فى طقس يؤدى إلى صدأ الحديد ويفضل عنها فى هذا الطقس الكبارى الخرسانية المسلحة أو سابقة الإجهاد.
٦- الظروف الطبوغرافية وحالة التربة عند موقع ما قد تقصر الإختيار على عدد محدد من الإختيارات فمثلا وادى ضيق صخرى يعتبر نموذجيا لإختيار كوبرى مقوس.
٧- ضعف طبقات التربة يمكن أن يؤدى إلى إختيار كبارى بسيطة الارتكاز بدلا من الكبارى المستمرة.
٨- الميزانية المتوفرة قد تحتم إستخدام كوبرى غاطس بدلا من كوبرى علوى على طريق ذى كثافة مرورية ضعيفة وهذا قد يؤدى بدوره إلى إختيار كوبرى ذى بلاطة خرسانية مسلحة.
٩- طبيعة المرور قد تقصر الإختيار على أنواع محددة من الكبارى فمثلا بالنسبة لحركة مرور السكك الحديدية فإن الجمالونات المعدنية أو الكوابيل المعدنية تكون مفضلة عن الكبارى المعلقة.
١٠- الخبرة الشخصية أو تخصص المؤسسة القائمة بالتصميم أو التنفيذ قد تؤثر فى إختيار نوع الكوبرى وخاصة إذا طرح فى مسابقة مفتوحة.

١١-٤ الأحمال

يتم حساب الأحمال على الكبارى طبقا للكود المصرى لحساب الأحمال والقوى فى الأعمال الإنشائية وأعمال المبانى حيث اشتمل الباب الخامس من هذا الكود على الأحمال على كبارى الطرق والأنفاق والبرابخ وتم تقسيمها إلى أحمال رئيسية وأحمال ثانوية وأحمال خاصة.

وتشتمل الأحمال الرئيسية على الأحمال الميته والأحمال الحية شاملة التأثير الديناميكى المصاحب لها ورفع الكوبرى لاستبدال الركائز وسبق الإجهاد وقوى الطرد المركزية.

وتشتمل الأحمال الثانوية على التغير فى درجات الحرارة ، ضغط الرياح ، قوى الفرامل ، مقاومة الركائز والفواصل للحركة والتشكل ، القوى على الدرابزينات ، هبوط محتمل حدوثه للأساسات وانكماش الخرسانة.

وتشتمل الأحمال الخاصة على الأحمال الناتجة عن التنفيذ واصطدام المركبات بعناصر المنشآت.

ويختص الباب السادس من الكود بالأحمال على كبارى السكك الحديدية وتم تقسيمها أيضا إلى أحمال ثانوية وأحمال خاصة. وتشتمل الأحمال الرئيسية على الأحمال الميتة والأحمال الحية شاملة التأثير الديناميكى المصاحب لها وقوى الطرد المركزية والتأثيرات الديناميكية للكبارى المتحركة.

وتشتمل الأحمال الثانوية على ضغط الرياح ، قوى الفرامل ، الصدمات العرضية ، التغير فى درجات الحرارة ، مقاومة الركائز والفواصل للحركة والتشكل ، وهبوط محتمل حدوثه للأساسات وقوة الطرد المركزية وانكماش الخرسانة.

وتشتمل الأحمال الخاصة على القوى على الدرابزينات وضغط الأتربة وضغط المياه والطفو وقوى التركيب وتأثير الإستقرار والتثبيت والكلال.

١١-٥ الاعتبارات العامة الخاصة بالتصميم

١١-٥-١ عام

التصميم الجيد للكوبرى يجب أن يحقق المتطلبات الوظيفية والإقتصادية والجمالية للكوبرى. ولهذا فإن المواصفات القياسية للكبارى يجب أن تتضمن الحدود الدنيا للعوامل التى تفى بهذه المتطلبات. ويشتمل هذا الباب على الاعتبارات العامة الخاصة بتصميم الكبارى الخرسانية المسلحة والكبارى الحديدية والكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد.

١١-٥-٢ الخرسانة المسلحة

١١-٥-٢-١ أسس التصميم

يمكن إستخدام إحدى الطريقتين التاليتين فى التصميم :

- طريقة المرونة (طريقة إجهادات التشغيل).
- طريقة حالات الحدود.

وتتلخص أسس التصميم لكل من الطريقتين فى تحديد الأمور التالية :

١- الخواص والمقاومات للمواد الداخلة فى تركيب الخرسانة المسلحة وتحديد العوامل التى تؤثر عليها وتحديد الخواص المميزة التى يتم تصميم الكوبرى على أساسها وتحديد معاملات الآمان الكافية أثناء الإنشاء والتشغيل.

٢- القوى الخارجية والأحمال الثابتة والمتحركة التى تؤثر على الكوبرى أثناء تشييده وتشغيله.

٣- القوى الداخلية فى عناصر الكوبرى المختلفة (عزوم الإنحناء - قوى القص - القوى المحورية).

٤- التأكد من تحقق التكامل الإنشائى بين العناصر المختلفة للكبارى بما يكفل عدم حدوث انهيار تتابعى يؤدى إلى انهيار كامل للكوبرى.

ويتم إستخدام أى من الطريقتين المذكورتين طبقا للأبواب الثالث والرابع والخامس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية فى التصميم حيث يختص الباب الثالث باعتبارات عامة فى تصميم القطاعات ويختص الباب الرابع بالتصميم بطريقة حالات الحدود بينما يختص الباب الخامس بالتصميم بطريقة المرونة (طريقة إجهادات التشغيل).

١١-٥-٢-٢ المواد

تتبع المواصفات القياسية المصرية الصادرة عن الهيئة المصرية للتوحيد القياسى لخواص المواد وإختبارها فى تعيين خواص المواد الداخلة فى تركيب الخرسانة المسلحة. وفى حالة عدم وجود مواصفة قياسية لأى من هذه المواد تتبع بالنسبة لها المواصفات الصادرة عن الهيئة الدولية للتوحيد القياسى International standardization organization (ISO) وذلك لحين صدور مواصفة قياسية مصرية من الهيئة المصرية العامة للتوحيد القياسى وضبط الجودة.

وفيما يلى بيان بالمواصفات المصرية الحالية ذات الصلة بهذا الشأن :

م.ق.م. ٣٧٣ / ١٩٩١ الأسمنت البورتلاندى العادى وسريع التصلد
م.ق.م. ١٤٥٠ / ١٩٧٩ الأسمنت البورتلاندى فائق النعومة ٤١٠٠
م.ق.م. ٩٧٤ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى الحديدى
م.ق.م. ٥٨٣ / ١٩٩٣ الأسمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات
م.ق.م. ٥٤١ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى منخفض الحرارة
م.ق.م. ١٩٩٢/٢١٤٩ الأسمنت البورتلاندى متوسط الحرارة
م.ق.م. ١٩٩٥/٢٧٩٦ الأسمنت عالى خبث الحديد
م.ق.م. ١٩٩٥/٢٧٩٧ الأسمنت عالى المقاومة للكبريتات
م.ق.م. ١٠٣١ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى الأبيض
م.ق.م. ١١٠٩ / ١٩٧١ ركام الخرسانة من المصادر الطبيعية - وتعديلاتها
م.ق.م. ١٩٦٩/٧٦ اختبار المعادن للشد
م.ق.م. ٢٦٢ / ١٩٨٨ أسياخ الصلب لتسليح الخرسانة - وتعديلاتها
م.ق.م. ١٦١٨ / ١٩٩٠ شبك أسياخ الصلب الملحوم لتسليح الخرسانة
م.ق.م. ١٦٥٨ طرق إختبار الخرسانة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٨ الجزء الأول : طريقة أخذ عينات الخرسانة الطازجة فى الموقع
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٩ الجزء الثانى : طريقة تعيين الهبوط للخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٩ الجزء الثالث : طريقة تعيين عامل الدمك للخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء الرابع : طريقة عمل أسطوانات الإختبار من الخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء الخامس : طريقة عمل مكعبات الإختبار من الخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء السابع : طريقة المعالجة العادية لعينات الإختبار
م.ق.م. ١٨٩٩ إضافات الخرسانة
م.ق.م. ١٨٩٩ / ١٩٩٠ الجزء الأول : الإضافات المخفضة للماء والإضافات المعجلة للشك والإضافات المبطئة للشك
م.ق.م. ١٩٤٧ / ١٩٩١ طرق أخذ عينات الأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ إختبار الخواص الفيزيقية والميكانيكية للأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الأول : تعيين زمن الشك للأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الثانى : تعيين نعومة الأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الثالث : إختبار مقاومة الأسمنت للضغط

م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الرابع : تقدير ثبات حجم الأسمنت (التمدد) بطريقة الأوتوكلاف
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الخامس : تقدير ثبات حجم الأسمنت (التمدد) بطريقة لوشاتيلية
م.ق.م.١٩٩٨/٣٣٧٥ المواصفات الفنية لتخزين الأسمنت واحتياطات التعامل مع الأسمنت

ويراعى ما يصدر من تعديلات بشأنها وكذلك أى مواصفات مصرية تستجد.

ويمكن الرجوع إلى الباب الثانى من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لتحديد خواص مواد الخرسانة المسلحة حيث :

البند ٢-٢-١ يحدد خواص الأسمنت
البند ٢-٢-٢ يحدد خواص الركام
البند ٢-٢-٣ يحدد خواص ماء الخلط والمعالجة
البند ٢-٢-٤ يحدد خواص الإضافات
البند ٢-٢-٥ يحدد خواص صلب التسليح للخرسانة المسلحة

١١-٥-٢-٣ رتبة الخرسانة f_{cu}

رتبة الخرسانة هى مقاومة الضغط المميزة لخرسانة Characteristic strength وتعرف بأنها قيمة إجهاد كسر المكعب الخرسانى القياسى الذى من غير المحتمل أن يقل عنه أكثر من ٥ % من عدد نتائج إختبارات تحديد المقاومة أثناء التنفيذ.

ويمكن الرجوع إلى الباب الثانى من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة لتحديد رتبة الخرسانة حيث :

البند ٢-٥-٢ يبين رتبة الخرسانة f_{cu}
البند ٢-٥-٤ يبين متوسط المقاومة المستهدف Target mean strength (f_m)
البند ٢-٥-٣ يبين هامش آمان تصميم الخلطة Safety margin of mix design (M)
البند ٢-٥-٥ يبين إختيار نسب مكونات الخلطة
البند ٢-٣-٤ يوضح الاعتبارات الخاصة لتأثير تحمل الخرسانة مع الزمن من حيث الحد الأقصى لمحتوى الأملاح والمواد الضارة فى ماء الخلط والحد الأقصى لمحتوى أيونات الكلوريدات فى الخرسانة والحد الأقصى لمحتوى الكبريتات فى الخرسانة والخرسانة فى الظروف الحمضية أو الظروف الكبريتية والحدين الأدنى والأقصى لمحتوى الأسمنت والحد الأقصى لنسبة الماء الى الاسمنت.

١١-٥-٢-٤ الاجهادات المسموح بها تحت تأثير الأحمال المختلفة

تتوقف الاجهادات المسموح بها تحت تأثير الأحمال المختلفة على الطريقة المستخدمة فى التصميم.

فإذا كانت طريقة حالات الحدود هى المستخدمة فى التصميم فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية حيث :

البند ٣-٢-١-١ من الباب الثالث : يحدد أحمال وأفعال التشغيل والأحمال والأفعال القصوى لحالات الحد الأقصى للمقاومة.
البند ٣-٢-١-٢ من الباب الثالث : يحدد معامل خفض المقاومة (معامل الأمان) لأخذ العوامل المختلفة التى تؤثر سلبيا على المقاومات القصوى للقطاعات المختلفة فى الاعتبار.

البند ٤-٢-١ من الباب الرابع :	يحدد حالة حد المقاومة القصوى لقطاع معرض لعزوم إنحناء أو لقوى لا مركزية.
البند ٤-٢-٢ من الباب الرابع :	يوضح حالة حد المقاومة القصوى فى القص.
البند ٤-٢-٣ من الباب الرابع :	يوضح حالة حد المقاومة القصوى فى اللى.
البند ٤-٢-٤ من الباب الرابع :	يحدد حالة المقاومة القصوى للتحميل (الارتكاز).

وإذا استخدمت طريقة المرونة (طريقة إجهادات التشغيل) فى التصميم فإنه يمكن الرجوع إلى البند ٥-٢ من الباب الخامس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لتحديد إجهادات التشغيل المسموح بها لكل من الخرسانة وصلب التسليح.

١١-٥-٢-٥ أسياخ التسليح والغطاء الخرسانى لصلب التسليح

يتم الرجوع إلى البند ٤-٢-٥ من الباب الرابع للكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لتحديد طول التماسك وطول الرباط ووصل صلب التسليح ، وإلى البند ٤-٣-٢-٣ب من الباب الرابع البند ٩-٧ من الباب التاسع لتحديد السمك الأدنى للغطاء الخرسانى لصلب التسليح. وإلى البند ٧-٣-٣ من الباب السابع لتحديد الحدين الأدنى والأقصى للمسافات بين الأسياخ.

١١-٥-٢-٦ العرض الفعال لشفة الكمرات على شكل حرف T أو L

يتم الرجوع إلى البندين ٦-٣-١-٩ ، ٦-٣-١-١٠ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لتحديد العرض الفعال لشفة الكمرات على شكل حرف T أو L .

١١-٥-٢-٧ تقطيع الأسياخ

يتم الرجوع إلى البند ٤-٢-٥ -٣ من الباب الرابع من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لتحديد وتوقف أسياخ صلب التسليح للعناصر المعرضة لعزوم إنحناء.

١١-٥-٢-٨ تصميم الخلطات الخرسانية

يستخدم فى إنشاء الكوبرى عدد من الخرسانات المختلفة فى الرتبة والمواصفات. فالخرسانة الكتلية تستخدم فى الدعائم والأساسات والخرسانة الغنية بالأسمنت تستخدم فى الأسطح المعرضة للبرى والخرسانة ذات رتبة معينة طبقا للأحمال والاجهادات تستخدم فى خرسانة جسم الكوبرى. وبعض الخرسانات قد يستخدم فيها أسمنت ذو طبيعة خاصة (مثل الأسمنت البورتلاندى منخفض الحرارة أو الأسمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات). ويتم الرجوع إلى البند ٢-٥-٥ من الباب الثانى من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة لتصميم الخلطات الخرسانية اللازمة للكبارى.

١١-٥-٢-٩ اعتبارات لتفصيلات الكبارى الخرسانية المسلحة

ينبغى أن تكون الرسومات التنفيذية للكبارى الخرسانية المسلحة واضحة التفاصيل وكاملة الأبعاد كما يجب أن تعد وفقا لحسابات سليمة وبطريقة تبسط أعمال الفرم وتسهل صب الخرسانة. ويتم الرجوع إلى الباب السابع من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لإعداد التفاصيل الإنشائية للكبارى الخرسانية المسلحة.

١١-٥-٣ الصلب

١١-٥-٣-١ المواد

الصلب المستخدم فى إنشاء الكبارى هو دائما الصلب الإنشائى (Structural steel) المطابق للمواصفات القياسية المصرية رقم ٢٦٠ / ١٩٧١ (وزارة الصناعة). ويستخدم الصلب المسبوك (Cast steel) فى الارتكازات فقط ولا يستخدم الحديد الزهر فى الكبارى الحديدية. ويتم الرجوع إلى الباب الثانى من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية
(Egyptian code of practice for steel constructions and bridges).

١١-٥-٣-٢ الاجهادات المسموح بها

يتحقق آمان الكوبرى الحديدى بحساب الاجهادات المتولدة فى جميع أجزائه والتأكد من أن هذه الاجهادات لا تتعدى الاجهادات المسموح بها لكل نوع من الاجهادات على حده وذلك عند تعرض أجزاء الكوبرى لأسوأ حالات التحميل من الأحمال الواردة فى الكود المصرى لحساب الأحمال والقوى فى الأعمال الإنشائية وأعمال المبانى ولتحديد الاجهادات المسموح بها فى الكبارى الحديدية يتم الرجوع إلى الباب الثالث من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

١١-٥-٣-٣ تفاصيل عامة للكبارى الحديدية

أ- البحر الفعال للكمرات الرئيسية للكوبرى هو المسافة بين نقط ارتكاز الكمرات وللكمرات العرضية هو المسافة بين المحاور الرأسية للكمرات الرئيسية.

ب- العمق الفعال للكمرات اللوحية (Plate girders) هو المسافة بين مركزى ثقل الشفتين العلوية والسفلية (Upper and lower flange) والعمق الفعال للكمرات الجمالونية (Trusses) هو المسافة بين مركزى ثقل العضوين العلوى والسفلى (Upper and lower chords).

ج- العمق الأدنى للكمرات اللوحية يجب ألا يقل عن ٠,٠٤ من البحر الفعال والعمق الأدنى للكمرات الجمالونية يجب ألا يقل عن ٠,١٠ من البحر الفعال.

د- التباعد بين الكمرات الرئيسية للكوبرى يجب ألا يقل عن ٢٠/١ من بحر الكمرة الفعال ولا يقل عن ٣/١ من عمق الكمرة.

هـ- أقل قطاعات وأقل تخانات يمكن إستخدامها فى الكبارى الحديدية يتم تحديدها بالرجوع إلى البند ٩-٦-٩ من الباب التاسع من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

و- الترخيم للكمرات اللوحية نتيجة الأحمال الحية فقط يجب ألا يزيد عن ٣٠٠/١ من البحر الفعال وبالنسبة للكمرات الجمالونية فإن الترخيم نتيجة الأحمال الحية (بدون التأثير الديناميكى) يجب ألا يزيد عن القيم التالية :

٩٠٠/١ من البحر الفعال لكبارى السكك الحديدية عندما تكون الكمرات من الصلب الطرى العادى.

٧٠٠/١ من البحر الفعال لكبارى السكك الحديدية عندما تكون الكمرات من الصلب عالى المقاومة.

٧٠٠/١ من البحر الفعال لكبارى المشاة عندما تكون الكمرات من الصلب الطرى العادى.

٥٥٠/١ من البحر الفعال لكبارى المشاة عندما تكون الكمرات من الصلب عالى المقاومة.

ز- الكمرات الرئيسية اللوحية والجمالونية بسيطة الارتكاز ذات طول أكثر من ١٥ م يجب تزويدها بتقوس لأعلى (Camber) مساويا للترخيم الناتج عن تحميل هذه الكمرات بالأحمال الميتة ونصف الأحمال الحية (بدون التأثير الديناميكى). وبالنسبة للكمرات اللوحية بسيطة الارتكاز ذات طول مساوى أو أقل من ١٥ م فإن هذا التقوس غير لازم.

ح- الطول الفعال للانبعاج للحالات المختلفة لنهايات الأعضاء يتم تحديده بالرجوع إلى الباب الخامس من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

ط- مساحة القطاع الفعال بالنسبة للأعضاء الحديدية المعرضة للشد تحسب طبقا للبند ٣-٧-١ من الباب الثالث من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
ى- خطوة المسامير البرشام والمسامير القلاووظ تحسب طبقا للبند ٦-٢-٢ من الباب السادس من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
ك- مسافة الحافة بالنسبة لمسامير البرشام والمسامير القلاووظ تحسب طبقا للبند ٦-٢-٣ من الباب السادس من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
ل- توقف ألواح الشفة للكمرات اللوحية يكون طبقا للبند ٧-١-٥ من الباب السابع من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
م- أقل تخانة لعصب الكمرات اللوحية يكون طبقا للبند ٧-١-٦-٢ من الباب السابع من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.
ن- إستخدام المعضدات (Stiffeners) فى الكمرات اللوحية يكون طبقا للبند ٧-٢-٣ من الباب السابع من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

١١-٥-٤ الخرسانة سابقة الإجهاد

١١-٥-٤-١ المواد

أ- الخرسانة

الخرسانة المستخدمة فى الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد يجب أن تكون خرسانة ذات كفاءة عالية.

ب- صلب سبق الإجهاد

الصلب عالى المقاومة المستخدم فى سبق الإجهاد يمكن أن يكون على شكل أسلاك مسحوبة صلبة أو أعصاب (Strands) أو أسياخ ويتم الرجوع الى البند ١٠-٢-٢ من الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشأت الخرسانية

١١-٥-٤-٢ اعتبارات التصميم

لتصميم العناصر الخرسانية سابقة الإجهاد يتم الرجوع الى البند ١٠-٣ من الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

١١-٥-٥ السمات الخاصة بحركة المرور على كبارى الطرق الرئيسية(11-40)
Traffic Aspects of Highway Bridges

أ- توقيع الكوبرى

من وجهة نظر الحركة المرورية فإن منشأ الكوبرى يجب أن يتوافق مع التخطيط العام للطرق مما قد يوجب إستخدام كبارى منحرفة (Skew). والمفضل هو إختيار زوايا انحراف صغيرة للكبارى الصغيرة وإختيار تقاطعات متعامدة ذات مصاعد ومهابط مناسبة للكبارى الطويلة.

ب- العرض الأدنى للطريق

أقل العروض الصافية للطريق لملائمة الأنماط المختلفة لحركة المرور هى كما يلى :

١- حركة مرور السيارات

كوبرى ذو حارة واحدة	٤,٢٥ م.
كوبرى ذو حارتين	٧,٥٠ م.
كوبرى ذو حارات متعددة	٣,٥٠ م لكل حارة زيادة عن الحارتين.

٢- حركة مرور الدراجات

بدون Overtaking	٢ م.
مع Overtaking	٣ م.

واسترشاديا لحساب العرض المطلوب للطريق فإن المعدلات التالية يمكن إستخدامها :
١- السيارات : ١٠٠٠ سيارة / ساعة لكل حارة ذات عرض ٣,٧٥ م.
٢- الدراجات : ٣٦٠٠ دراجة / يوم لحارتين (٢ م).

ج- الجزيرة الوسطى
فى حالة الكبارى ذات أربع حارات أو أكثر فيكون من المرغوب فيه إستخدام جزيرة وسطى ولأغراض إقتصادية فإن عرض هذه الجزيرة يجب أن يكون صغيرا ولكن لا يقل عن ١,٢ م.

د- الأرصفة
من المرغوب فيه تزويد الطريق بأرصفة ٠,٦٠ x ٠,٢٢٥ م على جانبيه.

هـ- ممرات المشاة
يمكن تزويد الطريق بممرات للمشاة على جانبيه وفى هذه الحالة فإن العرض الأدنى للممر يكون ١,٥ م للكبارى المنشأة فى المناطق الريفية ويزيد عن ذلك لكبارى المناطق الحضرية. ومعدلات المرور على ممرات المشاة يمكن اعتبارها ١٠٨ شخص / دقيقة. ويجب زيادة عرض ممرات المشاة لكل زيادة فى هذه المعدلات (٦٠و٠م لكل ٥٠% زيادة فى المعدلات).

و- الأسوار والدربزينات
يجب أن يكون إرتفاع الدربزينات ١,١ م فوق منسوب الرصيف وألا يزيد الإرتفاع الصافى بين العارضة السفلية للدرابزين وأعلى الرصيف عن ٠,١٥ م والمسافة بين العارضتين السفلية والعلوية للدرابزين يجب ملؤها بشكالات أفقية أو مائلة على مسافات متقاربة.

ز- عرض الكوبرى
عادة ما ينشأ الكوبرى بعرض أقل من عرض الطريق فى طرفيه وذلك لتقليل التكاليف. وقد أثبتت الدراسات أن ذلك يؤدى إلى زيادة معدلات الحوادث. ولذلك فإنه فى غير حالات الكبارى الطويلة جدا فإنه من المفضل أن يكون عرض الكوبرى مساويا لعرض الطريق.

١١-٥-٦ جماليات تصميم الكبارى
يجب توجيه الاهتمام لجماليات الكوبرى المراد إنشاؤه جنبا إلى جنب مع الاهتمام بوظائف هذا الكوبرى ولذلك فإن التصميم المعمارى للكوبرى يجب أن يسبق التصميم الإنشائى له. وفى الوقت الذى يجب أن تسود فيه وظيفة الكوبرى وملاءمته وتلبيته للاحتياجات فإن اعتبارات أخرى مثل التماثل والتوافق والتناسب والتعبير والبساطة والطراز والشعور والراحة والرشاقة وملاءمة البيئة يجب أن يشملها التصميم.

١١-٦ الكبارى الخرسانية المسلحة

١١-٦-١ عام
تناسب الخرسانة المسلحة إنشاء كبارى الطرق ذات البحور الصغيرة والمتوسطة وتعتبر التكلفة الكلية هى العامل الحاكم فى إختيار النوع الأمثل من الكبارى الخرسانية الملائم للحالة التى يتم دراستها. ومع ذلك فإن مشكلة الإختيار تبدو أحيانا معقدة لاعتبارات خاصة مثل : الجماليات ، الخلوص الخاص بالملاحة أو حركة المرور أسفل الكوبرى ، الوقت المحدد للإنشاء ، القيود الخاصة بإستخدام الشدات وغيرها.
والأنواع الشائعة من الكبارى الخرسانية المسلحة هى :
الكبارى ذات الكمرات على شكل حرف T .
الكبارى ذات الكمرات الصندوقية Box girder bridges.
الكبارى ذات الكابولى المتزن Balanced cantilever bridges .
الكبارى ذات الكمرات المستمرة.
الكبارى ذات الإطارات الجاسئة.
الكبارى المقوسة Arch bridges .
الكبارى ذات الكمرات المقوسة المربطة Bow string girder bridges .

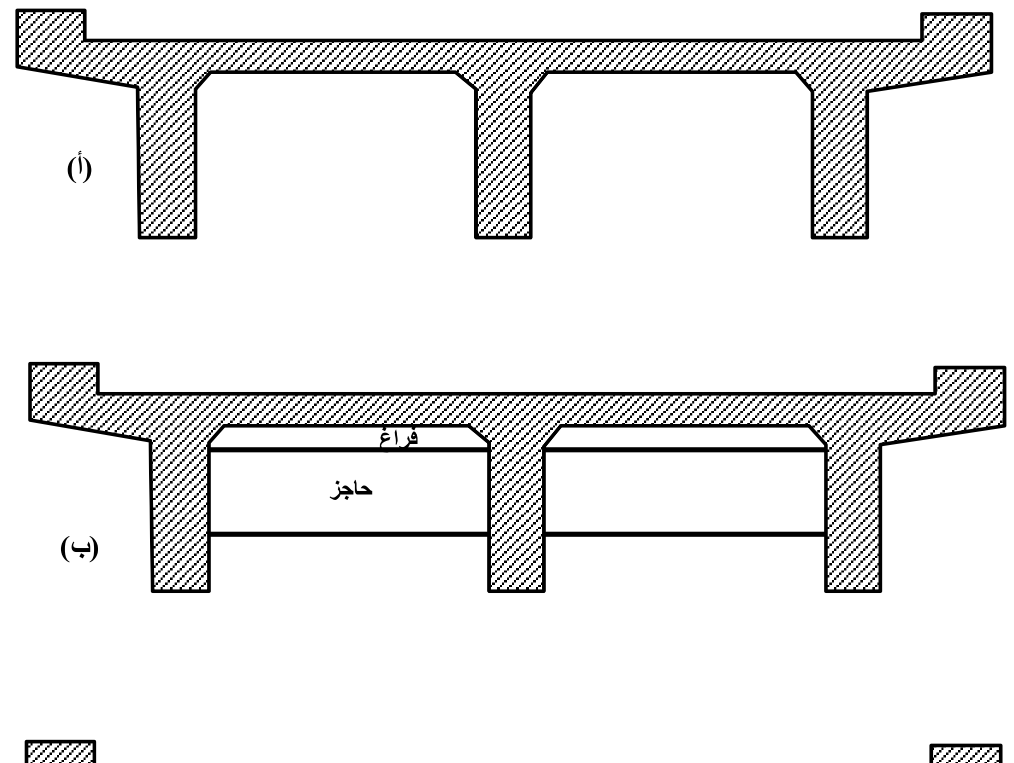
١١-٦-٢ الكبارى ذات الكمرات على شكل حرف T

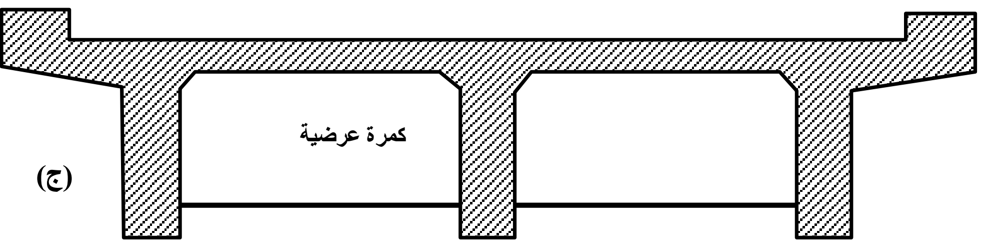
١١-٦-٢-١ عام
الكبارى ذات الكمرات على شكل حرف T تمثل النمط السائد للكبارى الخرسانية المسلحة ذات البحور التى تتراوح بين ١٠ - ٢٥ متر. وتسمى بهذا الاسم نظرا لأن الكمرات الرئيسية الطولية لهذا النوع من الكبارى تصمم بالاشتراك مع جزء من البلاطة الخرسانية للكوبرى والتى تصب كجزء واحد مع الكمرات. والكمرات على شكل حرف T نادرا ما تنفذ ككمرات بسيطة الارتكاز لبحر أكثر من ٢٥ مترا حيث تكون الأحمال الميتة فى هذه الحالة ثقيلة جدا.

وتصنف الكبارى ذات الكمرات على شكل حرف T إلى ثلاثة نماذج كما هو موضح بالشكل (١١-١) :

أ- نموذج الكمرة والبلاطة وفيه ترتكز بلاطة الكوبرى وتصب كجزء واحد على الكمرات الرئيسية الطولية ولا يوجد بهذا النموذج كمرات عرضية. وفى هذا النموذج تصمم بلاطة الكوبرى كبلاطة ذات إتجاه واحد بين الكمرات الطولية. والنظام الإنشائى لهذا النموذج ذو جساءة التواء ضعيفة مما قد يعرض قاع الكمرات الطولية لإزاحات عرضية.

ب- نموذج الكمرة والبلاطة والحاجز (Diaphragm) وفيه أيضا ترتكز بلاطة الكوبرى وتصب كجزء واحد على الكمرات الرئيسية الطولية. وتضاف الحواجز التى تربط بين الكمرات الطولية عند أماكن ارتكاز هذه الكمرات عند موضع أو أكثر من بحر هذه الكمرات. ولكن لا تمتد هذه الحواجز من أعلى حتى بلاطة الكوبرى وبذلك تتصرف هذه البلاطة إنشائيا كبلاطة ذات إتجاه واحد مرتكزة على الكمرات الطولية. ويتميز النظام الإنشائى لهذا النموذج بجساءة التواء عالية مقارنة بالنموذج السابق.





شكل (١١-١) قطاعات نمطية لكبارى ذات كمرات على شكل حرف T

ج- نموذج الكمرة والبلاطة والكمرة العرضية والذى يشتمل على ثلاثة كمرات عرضية على الأقل تمتد حتى أعلى بلاطة الكوبرى وتصب معها كجزء واحد. وفى هذا النموذج فإن بلاطة الكوبرى ترتكز من جوانبها الأربعة على الكمرات الطولية والكمرات العرضية وبذلك فإن هذه البلاطة تصمم كبلاطة ذات إتجاهين مما يؤدى إلى الاستغلال الأمثل لصلب التسليح وإلى سمك أقل للبلاطة وبالتالى إلى تخفيض الأحمال الميتة على الكمرات الطولية الرئيسية. ويؤدى وجود الكمرات العرضية إلى زيادة جساءة الكوبرى مما ينعكس على حسن توزيع الأحمال المركزة على الكمرات الطولية كما يؤدى - مع اعتبار بلاطة الكوبرى بلاطة ذات إتجاهين - إلى زيادة المسافة بين الكمرات الطولية وبالتالى تقليل عددها وينعكس ذلك على تقليل نفقات إنشاء الكوبرى.

ونظرا لأن نموذج ج ذا الكمرة والبلاطة والكمرة العرضية يعطى أقل ترخيم وأفضل توزيع للأحمال المركزة وأعلى حمل أقصى فإنه يوصى بإستخدام هذا النموذج حيثما كان هذا ممكنا.

١١-٦-٢-٢ عدد الكمرات الرئيسية والمسافات بينها
يعتمد عدد الكمرات الرئيسية الطولية والمسافات بينها عند إنشاء كوبرى من الخرسانة المسلحة على التكلفة الإقتصادية للكوبرى. لذلك وقبل اتخاذ قرار نهائى بهذا الشأن يجب عمل مقارنة من ناحية التكاليف بين عدة بدائل لقطاع الكوبرى تحتوى على عدد مختلف من الكمرات الطولية ثم إختيار القطاع الذى يحقق أقل تكلفة إقتصادية ويفى فى نفس الوقت بمتطلبات الكوبرى. وقد أثبتت الخبرة العملية أن قطاعا ذا ثلاث كمرات طولية (شكل ١١-١) يكون أكثر إقتصادا من قطاع ذى أربع كمرات وذلك لكوبرى ذى حارتين وبدون ممر مشاة.

١١-٦-٢-٣ الكمرات العرضية
تزود الكبارى بالكمرات العرضية لزيادة جساءة الكمرات الطولية وتقليل الالتواء بالكمرات الخارجية منها. كما تقوم الكمرات العرضية بالعمل على مساواة الترخيم بين الكمرات الطولية ذات الأحمال الثقيلة وتلك التى تحمل أحمالا أقل وخاصة فى حالة الأحمال المركزة. وعموما فعندما تقل المسافة بين الكمرات العرضية عن ١,٨ مرة المسافة بين الكمرات الطولية فإن بلاطة الكوبرى يمكن تصميمها باعتبارها بلاطة ذات إتجاهين. ويجوز إستخدام الحواجز بدلا من الكمرات العرضية فى بعض الحالات الخاصة.

١١-٦-٢-٤ مكونات الكوبرى ذى الكمرات على شكل حرف T
يتكون جسم الكوبرى ذى الكمرات على شكل حرف T من الأجزاء التالية :
أ- بلاطة الكوبرى.
ب- الجزء الكابولى.
ج- ممر مشاة (إن وجد) وأرصفة ودرابزينات.
د- كمرات طولية تصمم على أساس أن قطاعها على شكل حرف T.
هـ- كمرات عرضية أو حواجز.
و- طبقة التغطية Wearing coat .

وتستخدم تفاصيل قياسية لكل من الأرصفة والدربزينات. وطبقة التغطية يمكن أن تكون من الخرسانة الإسفلتية أو الخرسانة الأسمنتية بسمك متوسط فى حدود ٧,٥ سم. ويمكن أن يزود الكوبرى بممرات للمشاة بعرض حوالى ١,٥ م فى جانبيه عند إنشائه فى منطقة حضارية ويمكن أن تزود كبارى المناطق الريفية أيضا بممرات إذا كان الطول الكلى للكوبرى كبيراً.

١١-٦-٢-٥ تصميم بلاطة الكوبرى
إذا كانت بلاطة الكوبرى ذات إتجاه واحد وترتكز على الكمرات الطولية فقط فإن التحليل الإنشائى لها يكون طبقا للبند ٦-٢-١ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

أما إذا كانت بلاطة الكوبرى ذات إتجاهين وترتكز على الكمرات الطولية والكمرات العرضية فإن التحليل الإنشائى لها يكون طبقا للبند ٦-٢-٢ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

وإذا ما تعرضت البلاطة (سواء ذات إتجاه واحد أو ذات إتجاهين) إلى حمل مركز فإن التحليل الإنشائى لها يكون طبقا للبند ٦-٢-٤ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية .

١١-٦-٢-٦ الجزء الكابولى
غالبا ما يتعرض الجزء الكابولى لأحمال الأرصفة والدرابزينات وممر المشاة (إن وجد) وجزء من أحمال الكوبرى. والقطاع الحرج لعزم الإنحناء للكابولى يكون عند اتصال الكابولى بالكمرة الطولية الخارجية ويكون البحر الفعال للكابولى مساويا القيمة الأقل من :

- طول البلاطة الكابولية مقاسا من محور الكمرة الطولية فى حالة كونها امتدادا لبلاطة داخلية.
- الطول الخالص للبلاطة الكابولية مضافا إليه السمك الأكبر للبلاطة الكابولية.

وذلك طبقا للبند ٦-٢-١-١ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

ويجب أن يمتد حديد تسليح الجزء الكابولى داخل بلاطة الكوبرى لمسافة يمكن تحديدها طبقا للبند ٤-٢-٥-١ من الباب الرابع من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

١١-٦-٢-٧ تصميم الكمرات الطولية
لحساب عزم الإنحناء الناتج من الأحمال الحية فإنه يجب توزيع هذه الأحمال بين الكمرات الطولية للكوبرى. ويمكن تقدير هذا التوزيع وحساب عزوم الإنحناء فى الكمرات الطولية للكوبرى بطرق عديدة من طرق التحليل الإنشائى أو بإستخدام الحاسب الآلى. ويكون هذا التحليل النظرى ضروريا للكبارى المنحرفة Skew bridges أو الكبارى ذات الإنحناءات الحادة Sharp curvatures . ولكن فى الحالات العادية يمكن إستخدام الطريقة الوصفيه التالية مرجع {١١-٣٣}،{١١-٣٤}،{١١-٣٥}

عزم الإنحناء الناتج من الأحمال الحية يمكن حسابه لكل كمرة بتحميل الكمرة بكسر من أحمال عجلات المركبة القياسية (الأمامية والخلفية) ويحسب هذا الكسر (DF) من العلاقة $DF = \frac{S}{D}$

حيث

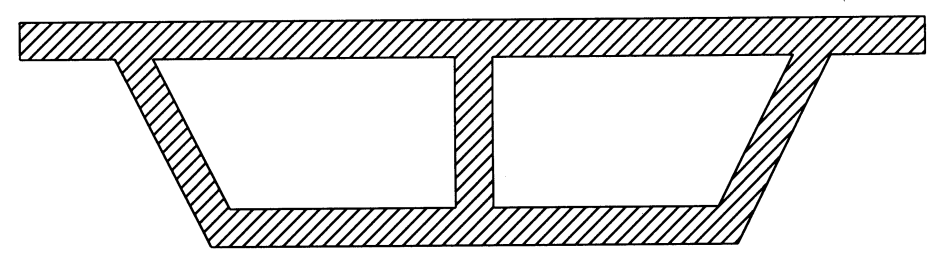
S = هى متوسط المسافات بين الكمرات الطولية بالمتر. وقيمةD= ٩٨ر١ فى حالة الكبارى ذات الحارة الواحدة ، D= ٨٣ر١ فى حالة الكبارى ذات الحارتين أو أكثر.

١١-٦-٢-٨ تصميم الكمرات العرضية
تحسب الأحمال الميتة على الكمرات العرضية باعتبار الجزء الذى تحمله من بلاطة الكوبرى بالإضافة إلى وزن الكمرة نفسها. ويحسب عزم الإنحناء الناتج عن الأحمال الميتة باعتبار الكمرة العرضية مستمرة لبحرين متجاورين وطبقا للبند ٦-٣-١-٦ من الباب السادس من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية. كما تحسب قوى القص الناتجة عن الأحمال الميتة طبقا لنفس البند. ويحسب عزم الإنحناء الناتج عن الأحمال الحية باعتبار الوضع الحرج لعجلات المركبة القياسية فوق الكمرات العرضية والذى يعطى أكبر قيمة لعزم الإنحناء كما تحسب قوى القص الناتجة عن الأحمال الحية باعتبار وضع العجلات الذى يعطى أكبر قوة قص فى الكمرة العرضية.

ولضمان قيام الكمرات العرضية بدورها فى تربيط الكمرات الطولية وزيادة جساءة جسم الكوبرى فإن عمق الكمرات العرضية يجب أن يكون مقاربا لعمق الكمرات الطولية الرئيسية للكوبرى.

١١-٦-٣ الكبارى ذات الكمرة الصندوقية
تعتبر الكبارى الخرسانية المسلحة ذات الكمرة الصندوقية إقتصادية التكاليف عندما يتراوح بحر الكوبرى بين ٢٥ - ٣٠ متر. والميزة الهامة فى هذا النوع من الكبارى يتمثل فى جساءة الالتواء العالية له نتيجة القطاع الصندوقى المغلق وملاءمة تغيير عمقه على طول بحر الكوبرى. ويمكن تنفيذ هذا النوع من

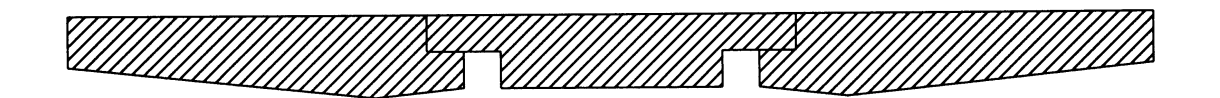
الكبارى بخلايا فراغية متعددة ويمكن إستخدامه فى الكبارى المستمرة والكبارى ذات الكابولى المتزن. ونظرا لجساءة الالتواء العالية لهذا النوع من الكبارى فإنه يكون مناسبا للكبارى التى تقتضى ظروف التخطيط أن تكون منحنية فى المسقط الأفقى. والخلايا الفراغية يمكن أن تكون على شكل مستطيل أو شبه منحرف. ويوضح الشكل رقم (١١-٢) القطاع النموذجى لكوبرى من الخرسانة المسلحة ذى كمرة صندوقية. وتشتمل الكمرة الصندوقية على المكونات الآتية : الجزء الكابولى شاملا الرصيف ، بلاطة الطريق العلوية ، البلاطة السفلية ، الأعصاب الرأسية للكمرة والحواجز (Diaphragms) . وتصميم الكمرة اصندوقية مماثل لتصميم الكمرة ذات القطاع على شكل حرف T . وعادة ما تصمم الأعصاب الرأسية للكمرة لتقاوم قوى القص.



شكل (١١–٢) قطاع نمطى لكوبرى ذو كمرة صندوقية

١١-٦-٤ الكبارى ذات الكابولى المتزن Balanced Cantilever Bridges

بإستخدام البحور المستمرة فإن عزوم الإنحناء الحاكمة يمكن تقليلها بما يسمح بزيادة أطوال البحور للكوبرى. ولابد من وجود ركائز جاسئة للكبارى المستمرة حيث أن هبوط الركائز يتسبب فى خلق عزوم إنحناء إضافية بل يمكن تغير إتجاهات عزوم الإنحناء الأصلية. ولذلك فإنه فى حالة البحور المتوسطة التى تتراوح بين ٣٥ - ٦٠ متر فإن خليطا من البحور المرتكزة والكوابيل والبحور المعلقة يمكن إستخدامها كما هو موضح بالشكل (١١-٣). والكبارى التى تنفذ بهذا الأسلوب تعرف بالكبارى ذات الكابولى المتزن وتسمى الوصلة بين البحر المعلق وطرف الكابولى بالمفصلة. ويجب أن يكون الارتكاز عند المفصلة من النوع المثبت المتمدد ويمكن تنفيذه على شكل ألواح منزلقة ، بكرات (Roller rocker) أو مخدات نيوبرين ويجب ملء فاصل التمدد بمادة مطاطية عند منسوب طبقة تغطية السطح (Wearing coat).



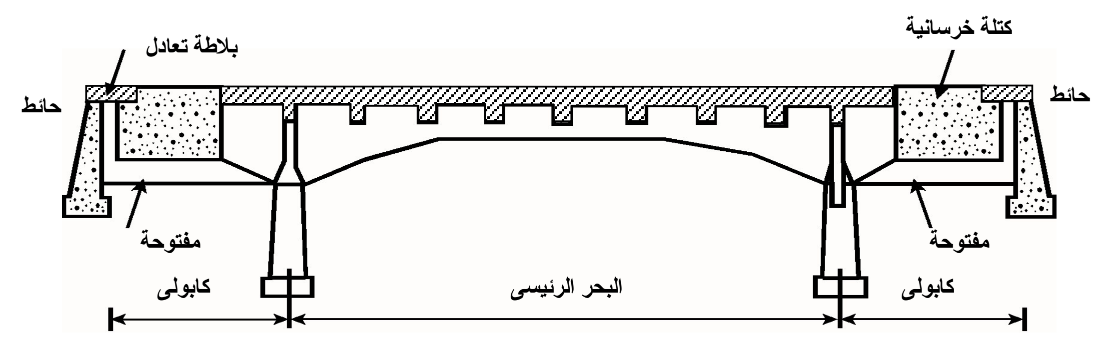
شكل (١١-٣) كبارى ذات كوابيل متزنة

وبحر الكابولى عادة ما يتراوح بين ٠,٢٠ - ٠,٢٥ من البحر المرتكز. ويصمم البحر المعلق باعتباره بحرا بسيط الارتكاز بركائز عند المفصلات. ويجب وضع تسليح كاف عند نهايات البحر المعلق ليتحمل قوى القص بأمان. ولتصميم البحر المرتكز فإنه يجب اعتبار حالات التحميل التى تعطى أقصى قيم لعزوم الانحناء السالية والموجبة وقوى القص.

وقطاع الكوبرى ذى الكابولى المتزن يمكن أن يكون كمرة على شكل حرف T أو كمرة صندوقية. وحيث أن عزم الإنحناء السالب يكون عادة أكبر من عزم الإنحناء الموجب فى منتصف البحر فإن عمق الكمرة عند الركيزة يكون أكبر من عمقها فى منتصف البحر ، لذلك يمكن تصميم القطاع الطولى للكمرة ليكون

على شكل قطع مكافئ (Parabola) أو على شكل شبة منحرف عند الركائز يتصل بمستطيل فى الجزء الأوسط من البحر المرتكز (شكل ١١-٣).

وفى بعض الأحيان يتم تنفيذ هذا النوع من الكبارى بشكل مختلف فيما يعرف بالكوبرى ذى الكوابيل ذات الوزن المعاكس (Bridge with counter weighted cantilevers) كما هو موضح بالشكل (١١-٤) وهذا الشكل يصبح مناسبا فى حالات الكبارى ذات الفتحة الواحدة والعابرة لخطوط السكك الحديدية فى المناطق المستوية. وحيث أن هذا المنشأ محدد أستاتيكيا ومصحوبا بردود فعل رأسية فقط عند الركائز فإن ذلك يؤدى إلى دعائم صغيرة. ويتم تحديد حجم وشكل الكابولى ذى الوزن المعاكس بعد محاولة عدة توليفات (Combinations) . وعادة ما يكون طول الكابولى من ١ / ٥ - ١ / ٣ البحر الرئيسى. والكابولى يأخذ شكل كتلة ثقيلة وقصيرة أو كتلة طويلة وخفيفة نسبيا. وينصح بإضافة بلاطة تعادل (Equalizing slab) عند طرفى الكوبرى ، كما هو موضح بالشكل (١١-٤) ، لتنظيم حركة المرور عند حدوث آية حركة رأسية لطرف الكابولى.



شكل (١١-٤) كوبرى ذو كوابيل بأوزان معاكسة

ويتميز تصميم الكبارى ذات الكابولى عن تصميم الكبارى ذات الكمرة بسيطة الارتكاز بما يلى :
أ- تقليل كميات الشدات والخرسانة وصلب التسليح.
ب- رد فعل رأسى محورى عند الدعائم ينتج عنه دعائم نحيفة.
ج- عدد أقل من الركائز المتمددة (Expansion bearings) مما يقلل من التكلفة الابتدائية ويقلل الصيانة.

والعيب الوحيد فى هذا النوع من الكبارى يتمثل فى المهارة الزائدة المطلوبة فى المهندس المصمم والتفاصيل الفائقة لصلب التسليح.

١١-٦-٥ الكبارى ذات الكمرات المستمرة

الكبارى ذات الكمرات المستمرة والتى لا تتصل كجزء واحد مع الركائز (Not connected monolithically) تعتبر مناسبة عند توفر ركائز جاسئة (Unyielding) . والبحور يمكن أن تكون متساوية ولكن عادة ما تكون البحور الطرفية أقل من البحور المتوسطة بنسبة تتراوح بين ١٦ % - ٢٠ % . وجسم الكوبرى يمكن أن يكون على شكل بلاطة فقط أو كمرة على شكل حرف T أو كمرة ذات قطاع صندوقى . والقطاع الطولى للكوبرى ذى الكمرة المستمرة عادة ما يشتمل على أجزاء مسلوبة (Haunched profile) أو أجزاء مقوسة (Curved soffit) وذلك نتيجة لأن عزوم الإنحناء السالبة فوق الركائز تكون أكبر من عزوم الإنحناء الموجبة فى منتصف البحور. واسترشاديا فإنه فى حالة الكبارى ذات البلاطة المستمرة فإن سمك البلاطة عند الركائز يكون تقريبا مساويا ١,٣ - ١,٨ مرة السمك الأدنى للبلاطة عند منتصف البحر ويكون طول الجزء المسلوب فى حدود ٠,٢ - ٠,٢٥ من البحر. وجميع ركائز الكوبرى تكون من النوع المنزلق (المتمدد) عدا ركيزة واحدة من النوع الثابت.

والكبارى ذات الكمرة المستمرة تتميز عن الكبارى ذات الكمرة بسيطة الارتكاز بما يلى :

أ- عمق جسم الكوبرى عند منتصف البحر يكون أقل بكثير وهذا هام بشكل خاص عندما يكون الخلوص الرأسى أسفل جسم الكوبرى مقيدا.
ب- نتيجة لما سبق ذكره فإن كميات الخرسانة وصلب التسليح تكون أقل مما يوفر فى تكلفة إنشاء الكوبرى.
ج- الاحتياج إلى ركيزة واحدة فوق كل دعامة بدلا من ركيزتين فوق كل دعامة فى حالة الكمرة بسيطة الارتكاز مما يؤدى إلى دعامة أقل حجما.
د- الاحتياج إلى عدد أقل من وصلات التمدد.
هـ- ردود الأفعال تنتقل كقوى محورية للدعائم حيث الركيزة فى مركز الدعامة.
و- إهتزازات وترخيم أقل.

ويعيب الكبارى ذات الكمرة المستمرة مقارنة بالكبارى ذات الكمرة بسيطة الارتكاز ما يلى :

أ- الهبوط النسبى بين الدعائم والذى يؤدى إلى تولد عزوم إنحناء وقوى قص إضافية.
ب- تفاصيل صلب التسليح تحتاج إلى عناية خاصة.
ج- أسلوب صب الخرسانة وإزالة الفرم والشدات تحتاج إلى تخطيط دقيق.

١١-٦-٦ الكبارى ذات الإطار الجاسئ

الكبارى ذات الإطار الجاسئ هى منشآت تتكون من عدد من الكمرات (أو البلاطات) المتوازية والتى تتصل اتصالا جاسئا بالأعمدة الحاملة أو الدعائم. وعادة ما يصب جسم الكوبرى مع الدعائم فى ذات الوقت.

وتمتلك الكبارى ذات الإطار الجاسئ كل مميزات الكبارى ذات الكمرة المستمرة وتزيد عليها بالمميزات التالية :

أ- عدم الحاجة لوجود قواعد عند الركائز.
ب- الوصلات الجاسئة توفر ارتكازا أكثر اتزانا إذا ما قورن بدعائم منفصلة لها نفس الأبعاد.
ج- نظرا لصغر حجم الأعمدة والدعائم فإن مساحة الرؤيا لحركة المرور أسفل الكوبرى تكون أفضل.

١١-٦-٧ الكبارى المقوسة Arch Bridges

الكبارى الخرسانية ذات الكمرات المستقيمة تكون غير إقتصادية إذا ما زاد بحر الكمرة عن ٣٥ م. ويمكن إستخدام الكبارى المقوسة بكفاءة وإقتصاد للبحور من ٣٥ - ٢٠٠ م بل يمكن أن تزيد عن ذلك ويحسب للكبارى المقوسة الشكل الجمالى وأناقة المظهر.

ومن الناحية الإنشائية فإن للأقواس ثلاثة نظم رئيسية :

أ- قوس مثبت Fixed arch .
ب- قوس ذو مفصلتين Two hinged arch .
ج- قوس ذو ثلاث مفصلات Three hinged arch .

والكبارى المقوسة إما أن تكون ذات كمرات مقوسة أو بلاطات مقوسة. وفى حالة البلاطات المقوسة ذات البحور القصيرة فإن الفراغ بين أرضية الكوبرى أو منسوب الطريق وبين البلاطة المقوسة عادة ما يردم

حيث يستند هذا الردم على حوائط ساندة (Spandrel walls). أما فى حالة البحور الأطول فإن أرضية الكوبرى ترتكز على أعمدة أو حوائط والتى ترتكز بدورها على البلاطة المقوسة.

وجميع الأقواس تنتج قوة ضغط عند الركائز يتم مقاومتها بواسطة الدعائم. وهذا الضغط يؤدى إلى تخفيض قيم عزوم الإنحناء فى جميع قطاعات القوس. ومهمة المهندس المصمم هى زيادة هذا التخفيض بحيث تكون قطاعات القوس معرضة فقط لقوة ضغط. وفى الوقت الذى يمكن فيه إلغاء قيم عزوم الإنحناء فى قطاعات القوس الناتجة عن الأحمال الميتة بإختيار محور القوس مطابقا لخط ضغط عزم الإنحناء (Thrust line of bending moments) فإن الأحمال الحية لابد أن تسبب عزوم إنحناء.

ومحور القوس محكوم بثلاثة اعتبارات :

أ- البحر والإرتفاع من منسوب الطريق والخلوص الملاحى أو المرورى أسفله.
ب- الشكل الإقتصادى والتوفير فى مواد الإنشاء.
ج- الناحية الجمالية.

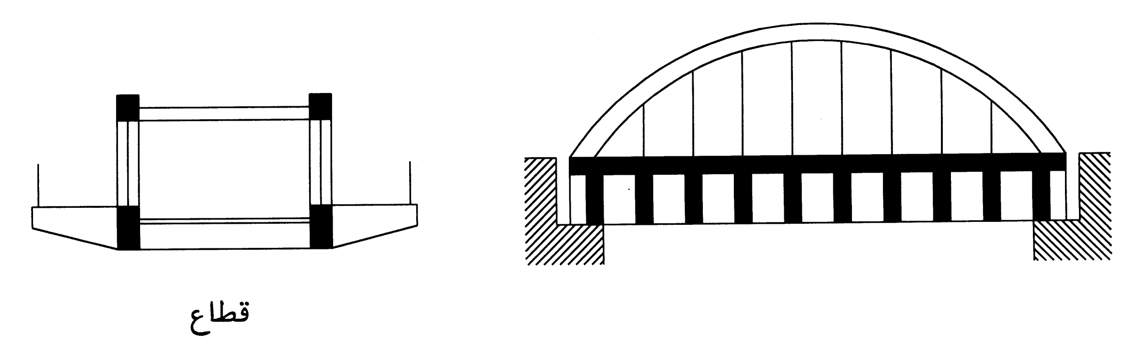
وأهم عامل فى تحديد شكل القوس هو نسبة الإرتفاع إلى البحر والقيمة الإقتصادية الاسترشادية لهذه النسبة تقع بين ٠,٢ - ٠,٣ وكلما زاد الإرتفاع قلت قوة الضغط وأدى هذا بالتالى إلى قطاعات أقل للقوس. والأشكال المعتاده للأقواس هى تلك التى تأخذ شكل قطع مكافئ (Parabolic) أو شكل متقطع (Segmental) أو قطع ناقص (Elliptical) .

وحيث أن كلا من القوس المثبت (Fixed arch) والقوس ذى المفصلتين (Two hinged arch) من المنشآت غير المحددة أستاتيكيا فيمكن تحليلهما بإستخدام إحدى طرق تحليل المنشآت غير المحددة أستاتيكيا أو بإستخدام برامج الحاسب الآلى.

أما بالنسبة للنوع الثالث من الأقواس ذى الثلاث مفصلات فهو منشأ محدد أستاتيكيا وبالتالى فإن تحليله بسيط للغاية. وبالنسبة لهذا النوع فإن كلا من تغير درجات الحرارة والانكماش وهبوط الدعامات ليس له تأثير على الاجهادات الداخلية به.

١١-٦-٨ الكبارى ذات الكمرة المقوسة المربطة Bow String Girder Bridges

الكوبرى ذو الكمرة المقوسة المربطة يتكون من قوسين يربط بين طرفى كل منهما عضو شد أفقى وبحيث تكون ردود الأفعال عند الركائز فى إتجاه رأسى فقط. وبذلك فإن هذا المنشأ يمتلك ميزة كونه قوسا ذا مفصلتين مع إلغاء الصعوبة الرئيسية عند ركائز القوس والمتمثلة فى قوى الضغط الأفقية ويستخدم هذا النوع من الكبارى عادة فى البحور من ٣٠ - ٣٥ م . وعادة ما يرتكز هذا القوس عند أحد طرفيه على ركيزة بسيطة (Hinge) وفى الطرف الأخر على ركيزة منزلقة (Roller) . وعادة ما تكون أرضية الكوبرى فى منسوب عضو الشد الأفقى وتصب معه. وبلاطة الكوبرى تصب فى نفس الوقت مع الكمرة المقوسة المربطة ويكون بحرها هو المسافة بين أعضاء الشد الأفقية. والكمرات العرضية لأرضية الكوبرى تحمل عند أطرافها بشدادات رأسية إلى الكمرة المقوسة المربطة (الرئيسية). وتوضع أعضاء تربيط بين الكمرتين المقوستين المرتبطتين لمقاومة أحمال الرياح (شكل ١١-٥).



قطاع

شكل (١١-٥) كوبرى ذو كمرة مقوسة مربط

ولتصميم الكمرات المقوسة المربطة تستخدم إحدى طرق تحليل المنشآت غير المحدده أستاتيكيا أو باستخدام برامج الحاسب الآلى

١١-٧ الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد

١١-٧-١ عام

إن تطبيق فكرة سبق الإجهاد على العناصر الإنشائية الخرسانية قد فتح أفاقا واسعة لأنواع جديدة من الكبارى وزاد من بحور الكبارى الخرسانية التقليدية. ويمكن تعريف سبق الإجهاد بأنه التأثير على عنصر إنشائى بقوة محسوبة بحيث أن الاجهادات الداخلية فى العنصر والناتجة من هذه القوى ومن أى حالة محتملة للأحمال الخارجية على هذا العنصر تكون متعادلة للدرجة المطلوبة. ويتم عادة تطبيق سبق الإجهاد على الخرسانة بإجهاد تسليح داخلى فى الخرسانه وبذلك تتولد إجهادات ضغط فى الخرسانة نتيجة شد هذا الصلب. والهدف من تطبيق سبق الإجهاد هو منع حدوث الشروخ فى الخرسانة نتيجة الاجهادات الرئيسية للشد أو الإنحناء المتولدة عن أحمال التشغيل.

١١-٧-٢ الملامح الخاصة بالخرسانة سابقة الإجهاد

الملامح الخاصة بالخرسانة سابقة الإجهاد مقارنة بالخرسانة المسلحة التقليدية يمكن إيجازها فيما يلى :

أ- منع الشروخ يؤدى إلى تحسين متانة وتحمل المنشأ وإطالة عمره الافتراضى.

ب- إستخدام مواد ذات مقاومة عالية بالإضافة إلى فعالية القطاع بأكمله فى مقاومة الاجهادات يؤدى إلى خفض الأحمال الميتة للمنشأ. وفى البحور الصغيرة وتحت ظروف معينة فإنه يمكن ترتيب وضع أسلاك سبق الإجهاد بحيث يمكن معادلة جزء من الحمل الميت على المنشأ.

ج- نتيجة إستخدام صلب عالى الشد فى الخرسانة سابقة الإجهاد فإن كمية التسليح اللازمة لمنشأ الكوبرى تنخفض انخفاضا ملموسا. وفى مقابل ذلك فإن نسبة تكلفة وحدة الصلب عالى الشد إلى وحدة الصلب الطرى العادى تكون عالية بحيث أن إقتصادية إستخدام الخرسانة سابقة الإجهاد بدلا من الخرسانة المسلحة التقليدية يصعب التنبؤ بها فيما عدا بالنسبة للكبارى ذات البحور الطويلة.

د- تقنية التشييد بإستخدام الخرسانة سابقة الإجهاد تؤدى إلى خضوع المواد المستخدمة (الخرسانة وصلب التسليح) إلى أقصى ظروف التشغيل أثناء فترة الإنشاء وبالتالى فإن هذه المواد وخاصة التسليح تختبر أوتوماتيكيا أثناء التشييد.

هـ- مقاومة القص للخرسانة تزداد نتيجة سبق الإجهاد مما يمكن من إستخدام أعصاب رفيعة للكمرات الخرسانية وهذا يؤدى بدوره إلى توفير فى الوزن وخاصة فى الكبارى ذات البحور الطويلة.

و- منع حدوث الشروخ تحت تأثير أحمال التشغيل يؤدى بدوره إلى تحسين مقاومة الخرسانة للكلال.
ز- يمكن تنفيذ المنشأ بصبه على مجموعة أجزاء ذات أحجام مناسبة للتداول ويتم تجميع هذه الأجزاء بإستخدام سبق الإجهاد. وهذه الأجزاء سابقة الصب يمكن تنفيذها تحت ظروف المصنع لدرجة عالية من الدقة وبإستخدام تقنية جيدة.
ح- القطاعات الصغيرة للمنشأ والناتجة عن إستخدام الخرسانة سابقة الإجهاد تؤدى إلى تحسين المظهر العام للمنشأ وبالتالى تجعله مناسبا للطرق الرئيسية فى المناطق الحضارية.

١١-٧-٣ أنواع سبق الإجهاد

هناك نوعان رئيسيان من سبق الإجهاد :
أ- الشد المسبق.
ب- الشد المؤخر.

ويتوقف إختيار النوع المناسب لكوبرى ما على عدة عوامل تشمل قرب وتوفر أدوات ووسائل تطبيق الشد المسبق ، دراية المقاول بمضمون طريقة الشد المؤخر وتوفر وسائلها لدية ، حجم العناصر المراد إجراء سبق الإجهاد لها ، عدد الوحدات المتماثلة فى النوع ، ...... وغير ذلك من العوامل. والشد المسبق بإستخدام أسلاك مستقيمة عادة ما يكون إقتصاديا فى الوقت الذى يكون فيه إستخدام أسلاك مقوسة فى الشد المؤخر أميز إنشائيا. ويمكن دمج الميزتين السابقتين بإستخدام خليط من الشد المسبق والشد المؤخر تحت ظروف معينة.

١١-٧-٤ الشد المسبق Pre-Tensioning

الشد المسبق هو طريقة لسبق الإجهاد يتم خلالها شد أسلاك الصلب قبل صب الخرسانة فى قوالبها. وفى هذا الأسلوب فإن الأسلاك أو الأعصاب من الصلب المستخدمة فى سبق الإجهاد تشد بواسطة رافعة هيدروليكية ترتكز على أكتاف قوية تضم بينها القوالب التى تصب فيها الخرسانة. وبعد شك وتصلد الخرسانة يتم تحرير الأسلاك من جهاز الشد وبذلك تنتقل القوى من الأسلاك إلى الخرسانة بواسطة التماسك بينهما. وتطبيق هذا الأسلوب على الكبارى يكون إقتصاديا فقط فى حالة وجود عدد كبير من الكمرات المتماثلة يتم صبها وإجهادها ويرجع الى الباب العاشر من (الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانيه والخاص بالخرسانه سابقة الإجهاد للمزيد من التفاصيل.

١١-٧-٥ الشد المؤخر Post-Tensioning

تتطلب طريقة الشد المؤخر اتخاذ الخطوات التالية :
١- تجميع أعصاب (أسلاك) سبق الإجهاد فى غلاف معدنى مرن وتوصل تجهيزات الربط (Anchor fittings) فى طرفيه.
٢- وضع حزمة أعصاب سبق الإجهاد فى القالب وتثبت فى مكانها هى والتسليح غير المستخدم فى الشد وأيضا التسليح الثانوى.
٣- تصب الخرسانة فى القالب ويتم معالجتها حتى تصل إلى القوة المحددة.
٤- يتم إجهاد الأعصاب إلى الحد المحسوب ثم يتم ربطها.
٥- يتم حقن فراغ الغلاف المعدنى المرن حول حزمة الأعصاب بعجينه الأسمنت (Grout) تحت ضغط.
٦- تغطية تجهيزات الربط بغطاء واقى.

وهناك العديد من النظم المختلفة التى يمكن إتباعها لتنفيذ الخطوات الرئيسية المذكورة سابقا.ويرجع الى الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانيه والخاص بالخرسانه سابقة الاجهاد.

وبالنسبه لإنشاء الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد فإن الفروق الأساسية بين إستخدام الشد المسبق والشد المؤخر يمكن بيانها فيما يلى :

أ- الشد المؤخر أكثر مناسبة للإجهاد المسبق فى موقع الإنشاء وذلك لعدم الحاجة لتجهيزات المصنع عالية التكاليف.

ب- المنشآت التى تصب فى موقعها يمكن سبق إجهادها بإستخدام الشد المؤخر حيث لا يمكن إستخدام الشد المسبق فى هذه الحالة.

ج- الأعصاب (الأسلاك) قد تتخذ مسارات منحنية مما يؤدى إلى مميزات إنشائية وخاصة مقاومة القص.

د- الحاجة إلى شد فردى خاص وتجهيزات ربط خاصة وغلاف معدنى مرن وحقن بعجينة الأسمنت يؤدى إلى زيادة تكلفة الشد المؤخر عن الشد المسبق.

هـ- من الممكن تصنيع كمرة من عدد من الأجزاء سابقة الصب والتى يتم سبق إجهادها بإستخدام الشد المؤخر لتكون وحدة إنشائية واحدة.

ويجب تفادى إستخدام المنشآت سابقة الإجهاد ذات الشد المؤخر غير المتماسك (Unbounded post-tensioning) فى الكبارى حيث يؤدى هذا النظام إلى عدم التأكد من المقاومة القصوى ومقاومة الكلال للكمرات. ولذلك فإن كمرات الكبارى تنفذ دائما بإستخدام الأعصاب (الأسلاك) المتماسكة. ويؤدى الحقن بعجينه الأسمنت داخل غلاف الأعصاب إلى منع صدأ أسلاك الشد وأيضا منع انهيار الكلال لهذه الأسلاك عند الربط فى الطرفين.

١١-٧-٦ الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد بالشد المسبق

إستخدام العناصر الإنشائية سابقة الصب وسابقة الإجهاد بالشد المسبق فى الكبارى يكون بإتباع إحدى الطرق التالية :

أ- عناصر يتم صبها فى صورتها النهائية فى المصنع ويتم تجميعها معا فى الموقع. وتمثل أجزاء البلاطات المصمتة والمفرغة المبينة بالشكل (١١-٦-أ) ، (١١-٦-ب) والكمرات المبينة بالشكل (١١-٦-ج) أمثلة لهذه العناصر. ويلاحظ أن الفتحات المبينة بالشكل (١١-٦-ب) يمكن أن تكون مستطيلة بدلا من دائرية وهذه الطريقة تعتبر مناسبة للبحور القصيرة للكبارى.

ب- الكمرات على شكل حرف T مقلوب توضع بجوار بعضها وتملأ الفراغات بينها بخرسانة تصب فى الموقع لتكوين بلاطة متكاملة كما هو موضح بالشكل (١١-٦-د). وتوضع أسياخ حديد عرضية للتماسك مباشرة أعلى الشفة السفلية للكمرات تمر من خلال ثقوب تم إعدادها مسبقا فى الكمرات سابقة الصب. ويمكن إستخدام هذه الطريقة لبحور حتى ٢٠ متر.
ونظرا للتوزيع الجيد للأحمال فى الإتجاه العرضى فى هذا النوع من المنشآت فإنه يمكن إلغاء سبق الإجهاد العرضى.
ومن المزايا الأخرى لهذا النظام الاستغناء عن الدعائم والشدات ، إستخدام أوناش صغيرة لوضع الكمرات فى مواضعها ، والإقتصاد فى تكلفة الكوبرى والمتمثل فى إستخدام عناصر سابقة الإجهاد صغيرة نسبيا بالاشتراك مع كميات كبيرة من الخرسانة المصبوبة فى الموقع.

ج- أرضية مركبة (Composite deck) تتكون من كمرات سابقة الصب توضع على مسافات محددة ويتم توصيلها ببعضها بواسطة حواجز (Diaphragms) وبلاطات تصب فى الموقع كما هو موضح بالشكل (١١-٦-هـ) مع العناية الخاصة بوضع موصلات القص المناسبة (Shear connectors). ويعتبر هذا الأسلوب الأكثر إقتصادا فى إنشاء الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد.

ويجب مراعاة الشروط والاحتياطات الوارده فى الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانيه عند تصميم الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد بالشد المسبق .

١١-٧-٧ الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد بالشد المؤخر

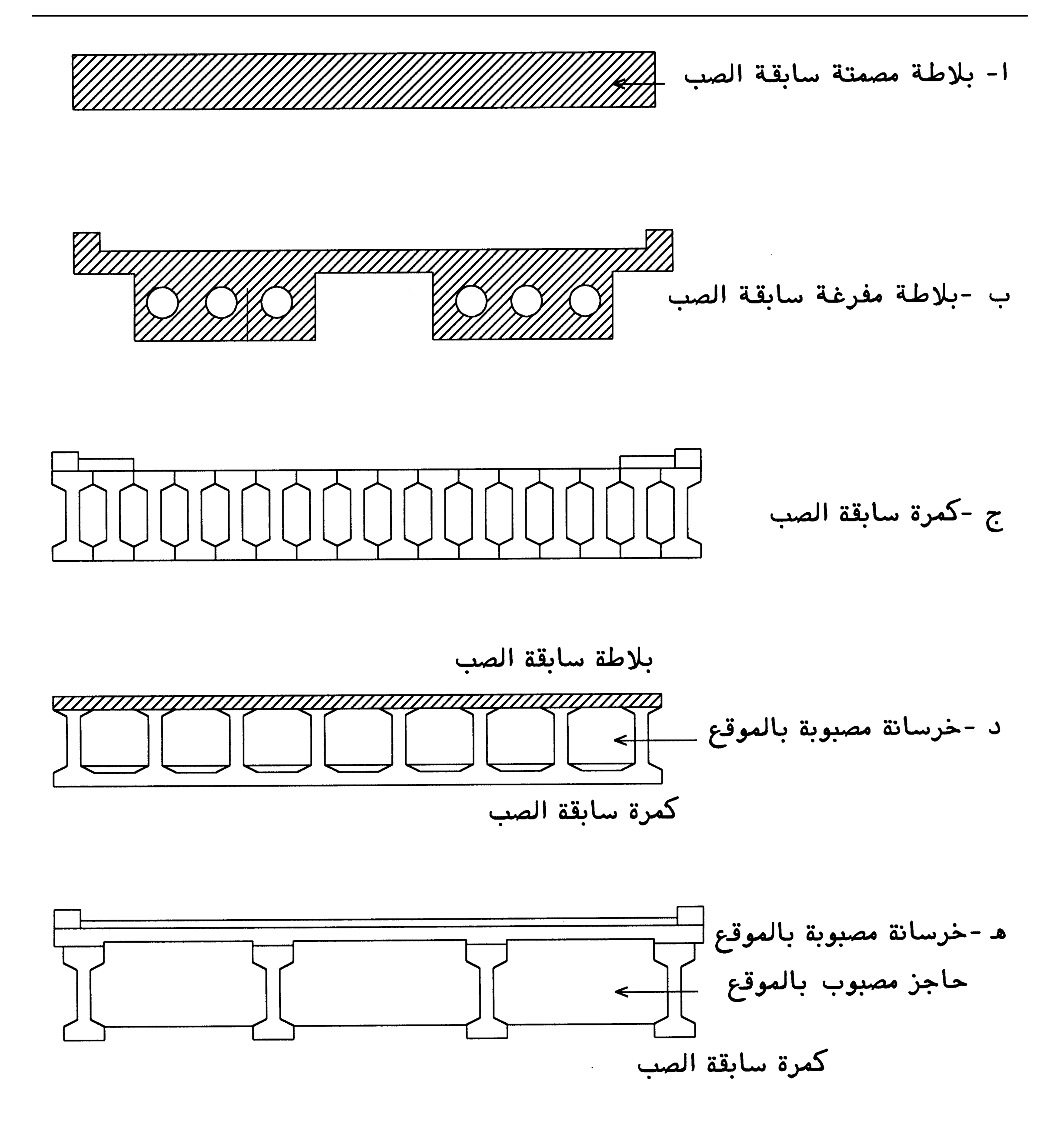
النظم الموضحة بالشكل (١١-٧) تمثل نماذج مناسبة للكبارى بسيطة الارتكاز ذات كمرات سابقة الإجهاد بالشد المؤخر. وتختلف هذه النظم فيما بينها كما يلى :

١- كوبرى مصبوب بكامله فى الموقع مثل النموذج الموضح بالشكل (١١-٧-أ) وهذا النموذج مناسب عندما تسمح ظروف الموقع موضع شدة الكوبرى من أرضية المجرى المائى ويكون هذا المجرى جافا معظم أيام السنة ولا يمكن إستخدام هذا النموذج إذا كان المجرى المائى مستخدما للرى الدائم أو إذا كان هناك عمق كبير للمياه بالمجرى المائى.

٢- كوبرى مكون من كمرات سابقة الصب وسابقة الإجهاد يتم تجميعها وسبق إجهادها عرضيا مثل النموذج الموضح بالشكل (١١-٧-ب). وهذا النموذج مناسب للبحور من ١٥ - ٢٠ متر. وتكون الكمرات العرضية سابقة الصب أيضا مع الكمرات الرئيسية. والفجوة (Gap) بين الكمرات الرئيسية سابقة الصب تكون حوالى ٢٥ مم ويتم ملؤها بخرسانة ناعمة (fine concrete) وذلك قبل التأثير بسبق الإجهاد العرضى.

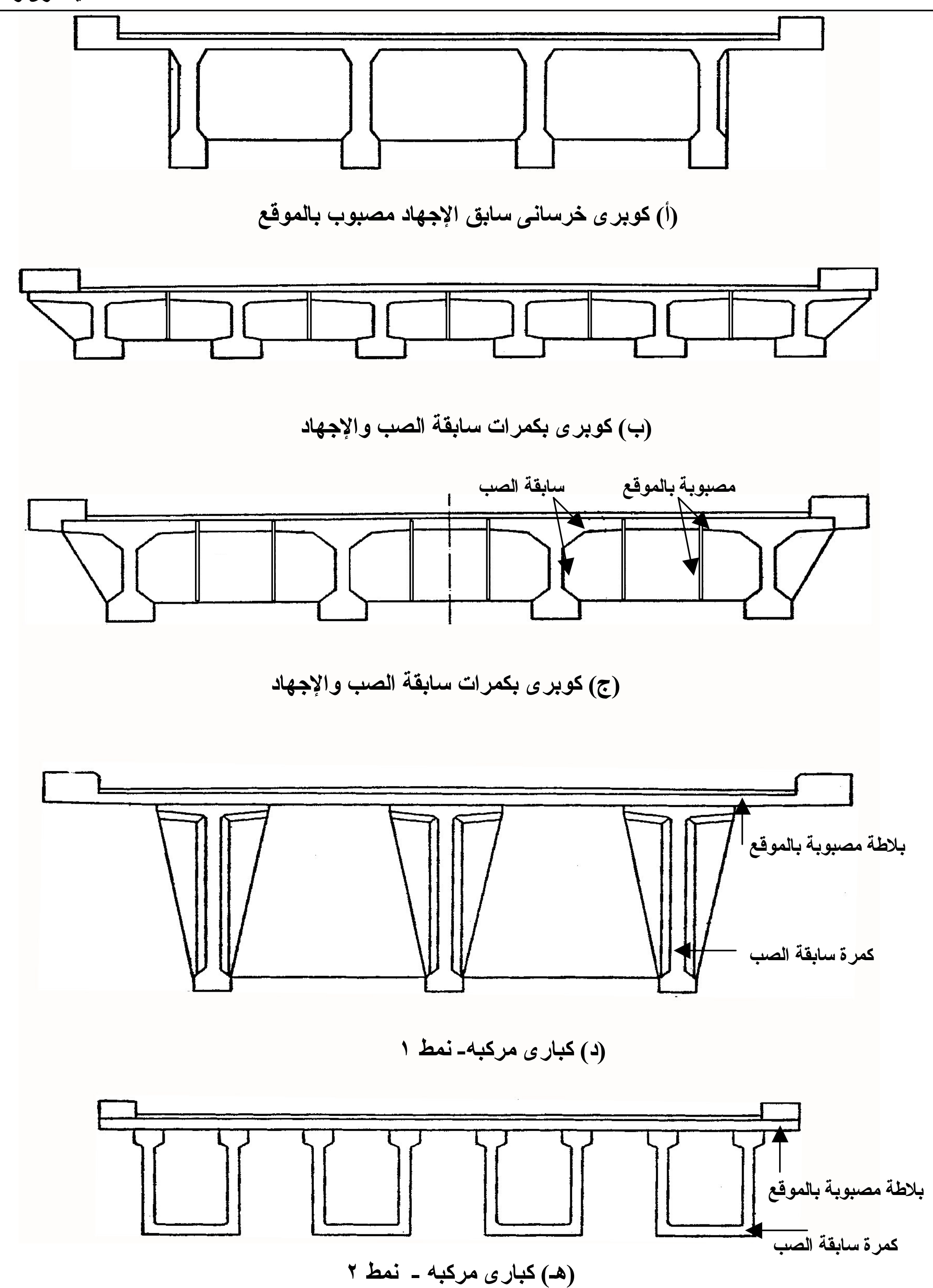
٣- منشأ مكون من كمرات سابقة الصب وسابقة الإجهاد ولكن بمسافات واسعة بين هذه الكمرات حيث يتم صب الكمرات العرضية والبلاطات بين هذه الكمرات بالموقع وهذا النموذج مبين بالشكل (١١-٧-ج). وفى هذا النموذج فإن سبق الإجهاد العرضى يكون أساسيا لتأكيد إستقرار (Stability) أرضية الكوبرى (Deck) المصبوبة فى الموقع وضمان عملها كوحدة واحدة. ويمكن إستخدام هذا النموذج لبحور تصل إلى ٣٠ متر.

٤- منشأ مركب (Composite) مكون من كمرات خرسانية سابقة الصب وسابقة الإجهاد مع بلاطة خرسانية تصب بالموقع. وهذا النموذج مناسب للبحور أكثر من ٣٠ متر حيث وزن المكونات يكون منخفضا. والكمرات الخرسانية الرئيسية سابقة الصب والإجهاد بهذا النموذج إما أن تكون على شكل T أو U كما هو موضح بالشكلين (١١-٧-د) ، (١١-٧-هـ) على الترتيب. والنظام الموضح بالشكل (١١-٧-د) يسمح بإستخدام أعصاب شد متماسكة مع الخرسانة (Bonded tendons) . ويتم تأمين جساءة الالتواء لهذا النموذج بإستخدام حواجز (Diaphragms) ذات سبق إجهاد عرضى يتم صبها فى الموقع تربط بين الحواجز القصيرة سابقة الصب ذات الميل. هذا ويجب العناية فى هذا النموذج بموصلات القص بين العناصر سابقة الصب والعناصر التى تصب بالموقع.



شكل (١١-٦) قطاعات كبارى بها بلاطات سابقة الصب بالشد المسبق

ويجب مراعاة الشروط والاحتياطات الوارده فى الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية عند تصميم الكبارى الخرسانية سابقة الإجهاد بالشد المؤخر .



شكل (١١-٧) كبارى نمطية بكمرات سابقة الإجهاد بالشد المؤخر

١١-٧-٨ الكبارى الخرسانيه المستمرة سابقة الإجهاد

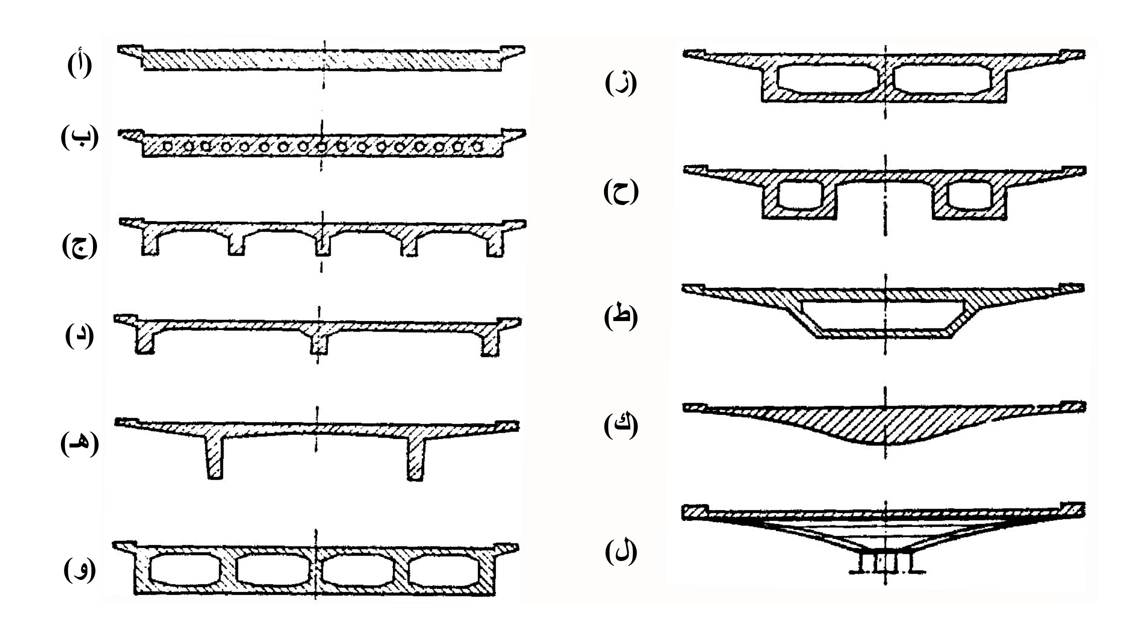
تستخدم الاستمرارية بفعالية فى الكبارى ذات البحور الطويلة. ونظرا لجساءتها العالية وقلة عمق قطاعاتها فإن الكبارى المستمرة تستخدم فى البحور الطويلة بدون إحداث ترخيمات متزايدة بل إن الاهتزازات الناتجة فى الكوبرى تكون أقل. والشكل (١١-٨) يوضح بعض نماذج لقطاعات الكبارى الخرسانية المستمرة سابقة الإجهاد. كما يعطى الجدول (١١-٨) أسفل شكل (١١-٨) بعض الأرقام الاسترشـادية الخاصة بحدود البحور وأعماق الكمرات للنماذج المختلفة الموضحة بالشكل (١١-٨)، ومرجع (١١-١)

وهناك العديد من الطرق التى يمكن إستخدامها فى إنشاء الكبارى الخرسانية المستمرة سابقة الإجهاد ذات البحور الطويلة ومنها طريقة الكابولى الحر الشائعة الإستخدام فى مثل هذا النوع من الكبارى. كما توجد أيضا طريقة الكوبرى الشريطى المجهد (Stress ribbon bridge) . هذا ويعتمد تصميم الكبارى الخرسانية المستمرة سابقة الإجهاد إلى حد كبير على الطريقة المتبعة فى الإنشاء.

١١-٧-٩ الاجهادات المسموح بها فى الخرسانة سابقة الإجهاد

١١-٧-٩-١ الاجهادات المسموح بها فى الخرسانة

يتم الرجوع الى الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانيه والخاص بالخرسانه سابقة الإجهاد.



شكل (١١-٨) أشكال نمطية لقطاعات كبارى خرسانية سابقة الإجهاد بالشد المؤخر

جدول (١١-٧) أشكال نمطية للمنشأ العلوى

التسمية بشكل (١١-٨)	النوع	مدى البحر (متر)	البحر / العمق
أ	بلاطة مصمتة	٢٠ إلى ٢٥	١٠ إلى ٣٠
ب	بلاطة مفرغة	٢٥ إلى ٣٥	٢٠ إلى ٣٠
ج	كمرات متعددة على شكل حرف T	٣٠ إلى ٤٥	١٥ إلى ٢٥
د	٣ كمرات على شكل حرف T	٣٠ إلى ٤٥	١٥ إلى ٢٥
هـ	كمرتان على شكل حرف T	٣٠ إلى ٤٠	١٢ إلى ١٥
و	صندوق متعدد الخلايا	٢٨ إلى ٤٠	٢٠ إلى ٢٥
ز	صندوق بخليتين	٣٠ إلى ٤٠	٢٠ إلى ٢٥
ح	صندوق بخليتين منفصلتين	٣٠ إلى ٧٠	٢٠ إلى ٢٥
ط	صندوق بخلية على شكل شبه منحرف	٣٠ إلى ٥٠	٢٠ إلى ٣٠
ك	شكل ظهر السمكة	٢٥	٢٥
ل	بلاطة على شكل عش الغراب	٣٠ إلى ٥٠	١٥ إلى ٢٠

١١-٧-٩-٢ الاجهادات المسموح بها فى أعصاب سبق الإجهاد Prestressing Tendons

يتم الرجوع الى الباب العاشر من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانيه والخاص بالخرسانه سابقة الإجهاد.

١١-٨ الكبارى المعدنية

١١-٨-١ عام

يمكن تصنيف الكبارى المعدنية تحت المجموعات التالية :

أ- الكبارى ذات الكمرات العادية المدرفلة (Rolled beams).
ب- الكبارى ذات الكمرات اللوحية (Plate girders).
ج- الكبارى ذات الكمرات الصندوقية (Box girders).
د- الكبارى ذات الكمرات الجمالونية (Truss bridges).
هـ- الكبارى المقوسة (Arch bridges).
و- الكبارى الملجمة (Cable stayed bridges).
ز- الكبارى الكابولية (Cantilever bridges).
ح- الكبارى المعلقة (Suspension bridges).

وتستخدم الكبارى ذات الكمرات العادية للبرابخ والسحارات والقناطر. أما الكمرات ذات الكمرات اللوحية فتستخدم للبحور بسيطة الارتكاز ذات أطوال أقل من ٥٠ متر وللبحور المستمرة حتى ٢٦٠ متر. وتعتبر الكبارى ذات الكمرات الجمالونية مناسبة للبحور من ٤٠ إلى ٣٧٥ متر فى حين أن الكبارى المقوسة تعتبر مناسبة للبحور المتوسطة من ٢٠٠ إلى ٥٠٠ متر. وتعتبر الكبارى الملجمة إقتصاديا للبحور من ٢٠٠ إلى ٥٠٠ متر. وتستخدم الكبارى الكابولية بنجاح للبحور من ٣٢٠ إلى ٥٥٠ متر. أما بالنسبة للبحور التى تزيد عن ٥٠٠ متر فإن الكبارى المعلقة تعتبر أكثر الحلول إقتصادا.

١١-٨-٢ الكبارى ذات الكمرات اللوحية Plate girder bridges

منذ بداية استخدام الصلب فى الكبارى فإن نظام الكبارى ذات الكمرات اللوحية يمثل الإختيار الأفضل وذلك من وجهة نظر الشكل الجمالى الأنيق وأيضا ملاءمة وسهولة صيانة هذا النوع من الكبارى. وتتكون كبارى الطرق ذات الكمرات اللوحية من أرضية الكوبرى (Deck slab) والتى تكون إما من الخرسانة المسلحة أو ألواح الصلب المدعمة والمغطاة بطبقة رقيقة من الخرسانة الأسفلتية والكمرات الطولية (Stringers) والتى ترتكز على كمرات عرضية (Cross beams) والتى ترتكز بدورها على الكمرات اللوحية الرئيسية. وفى حالة أن تكون أرضية الكوبرى من ألواح الصلب المدعمة فإن هذه الألواح تعمل كشفة (Flange) لكل من االكمرات الطولية والكمرات العرضية وأيضا الكمرات الرئيسية الطولية وفى هذه الحالة فإن الأحمال الميتة للكوبرى تقل بدرجة ملحوظة. وفى حالة كبارى السكك الحديدية ذات الكمرات اللوحية فإن الكمرات اللوحية تحمل الفلنكات الخشبية والتى تثبت فوقها القضبان الحديدية.

ويتم تربيط الكبارى ذات الكمرات اللوحية فى الإتجاه العرضى فى منسوب كل من الشفة العليا والشفة السفلى وذلك بالإضافة إلى التربيط الرأسى وذلك لمقاومة الأحمال العرضية للرياح والزلازل. ويتكون هذا التربيط الرأسى عادة من قطاعات زاوية ويكون فى نهايات الكوبرى وأيضا على مسافات طولية تتراوح بين ٤ إلى ٥ متر. وهناك دائما إختياران فى نظام الكبارى ذات الكمرات اللوحية :

أ- إستخدام كمرتين لوحيتين رئيسيتين متباعدتين مع إستخدام كمرات عرضية تحمل أرضية الكوبرى.

ب- إستخدام مجموعة كمرات لوحيه رئيسية على مسافات متقاربة.

ويقتضى النظام الأول أن تكون الكمرات العرضية متقاربة أو أن تستخدم الكمرات العرضية مع كمرات ثانوية طولية (Stringers) وتكون الكمرات الرئيسية الطولية فى هذه الحالة عميقة ويمكن أن تكون إقتصادية تحت ظروف معينة.

وفى النظام الثانى فإن الكمرات الرئيسية يتم تربيطها جيدا بواسطة الكمرات العرضية بما يضمن أن يعمل النظام كله كوحدة واحدة. ووجود مجموعة متقاربة من الكمرات العرضية يسمح بالتوزيع العرضى الجيد للأحمال المركزة بين الكمرات الرئيسية الطولية. وعادة ما يكون عدد الكمرات العرضية ثلاثة بالنسبة للبحور القصيرة وخمسة كمرات للبحور الأطول.

وبالنسبة لتصميم الكمرات اللوحية والشروط والمواصفات الخاصة بها يتم الرجوع إلى الباب السابع من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية (Egyptian code of practice, for steel constractions and bridges) وللتفتيش والصيانة وتقوية الكبارى الحديدية ذات الكمرات اللوحية يتم الرجوع إلى الباب الحادى عشر من الكود المذكور.

١١-٨-٣ الكبارى ذات الكمرات الصندوقية Box Girder Bridges

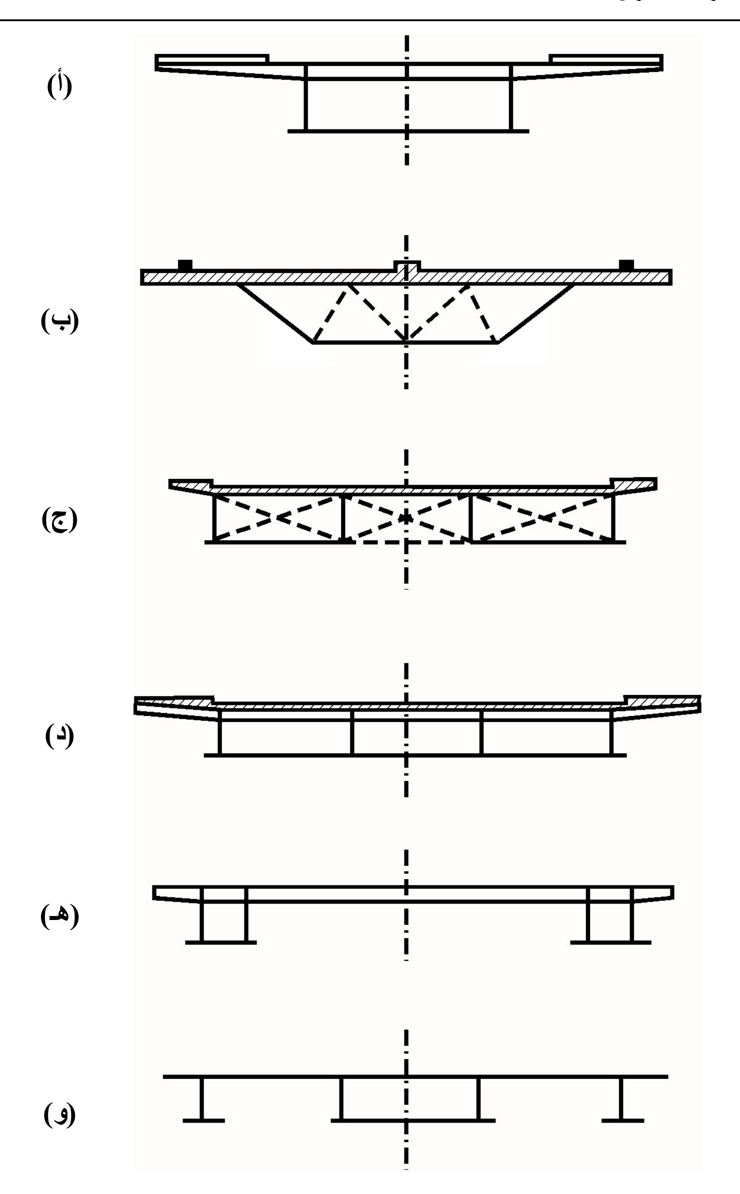
عندما تكون الشفة المعرضة للشد فى الكمرات اللوحية الطولية الرئيسية متصلة فإنها تكون ما يعرف بالكمرة صندوقية المقطع. ويوضح الشكل (١١-٩) نماذج مختلفة للكمرات الصندوقية وهى كالتالى :

أ- القطاع الصندوقى المستطيل ذو الكابولى عريض البحر على الجانبين.
ب- القطاع الصندوقى على شكل شبه منحرف.
ج- قطاعان صندوقيان متصلان بواسطة أعضاء تربيط لضمان العمل كوحدة واحدة.
د- قطاع صندوقى عريض مقسم إلى ثلاثة خلايا.
هـ- قطاعان صندوقيان متباعدان.
و- قطاع صندوقى أوسط مع كمرتين طوليتين على الجانبين.

وتمتلك الكبارى ذات الكمرات الصندوقية جساءة التواء ينتج عنها توزيع عرضى أفضل للأحمال. وعمق جسم الكوبرى ذى القطاع الصندوقى يكون صغيرا مما يؤدى إلى مصاعد ومهابط برتبة منخفضة. ويمكن أن تكون الركائز المتوسطة لهذا النوع من المنشآت منفصلة على شكل أعمدة نحيفة متصلة بإطارات عرضية مختفية مما يؤدى إلى الوفر فى زمن إنشاء وتكلفة الركائز والأساسات. وهذه الكمرات الصندوقية يمكن أن تكون ملائمة الإستخدام فى الكبارى المقوسة أو المستمرة وغالبا ما تتميز بالشكل الجمالى فى المناطق الحضارية.

والكمرات الصندوقية يمكن إستخدامها كمنشآت مركبة (Composite construction) بإضافة شفة علوية من الخرسانة. وبالنسبة للبحور القصيرة فإن الكمرات الصندوقية يمكن تصنيعها بالكامل فى الورشة مما يسمح بالإستخدام الأقصى للحام بالورشة بما يمثله من تحكم فى جودته وكفاءته. وفى حالة البحور الأطول فيمكن تصنيع أجزاء كبيرة بالورشة ويتم تجميعها بالموقع.

وتكلفة صيانة هذا النوع من الكبارى منخفضة حيث يوجد عدد قليل من الأركان المكشوفة المعرضة للصدأ ولكن متطلبات تصميم متشددة يجب توافرها فى الكبارى ذات الكمرات الصندوقية وأيضا متطلبات تنفيذ عالية الدقة لمنع حدوث آية عيوب أو انهيارات بهذه الكبارى.



شكل (١١-٩) أشكال نمطية لكمرات صندوقية

١١-٨-٤ الكبارى ذات الكمرات الجمالونية Truss Bridges

تعتبر الكبارى ذات الكمرات الجمالونية إقتصادية الإستخدام فى البحور التى تتراوح بين ١٠٠ - ٢٠٠ متر. وتكتسب الكبارى ذات الكمرات الجمالونية لاقتصادياتها من الميزتين الرئيسيتين التاليتين :

أ- القوى الرئيسية فى أعضاء الجمالون هى قوى محورية.

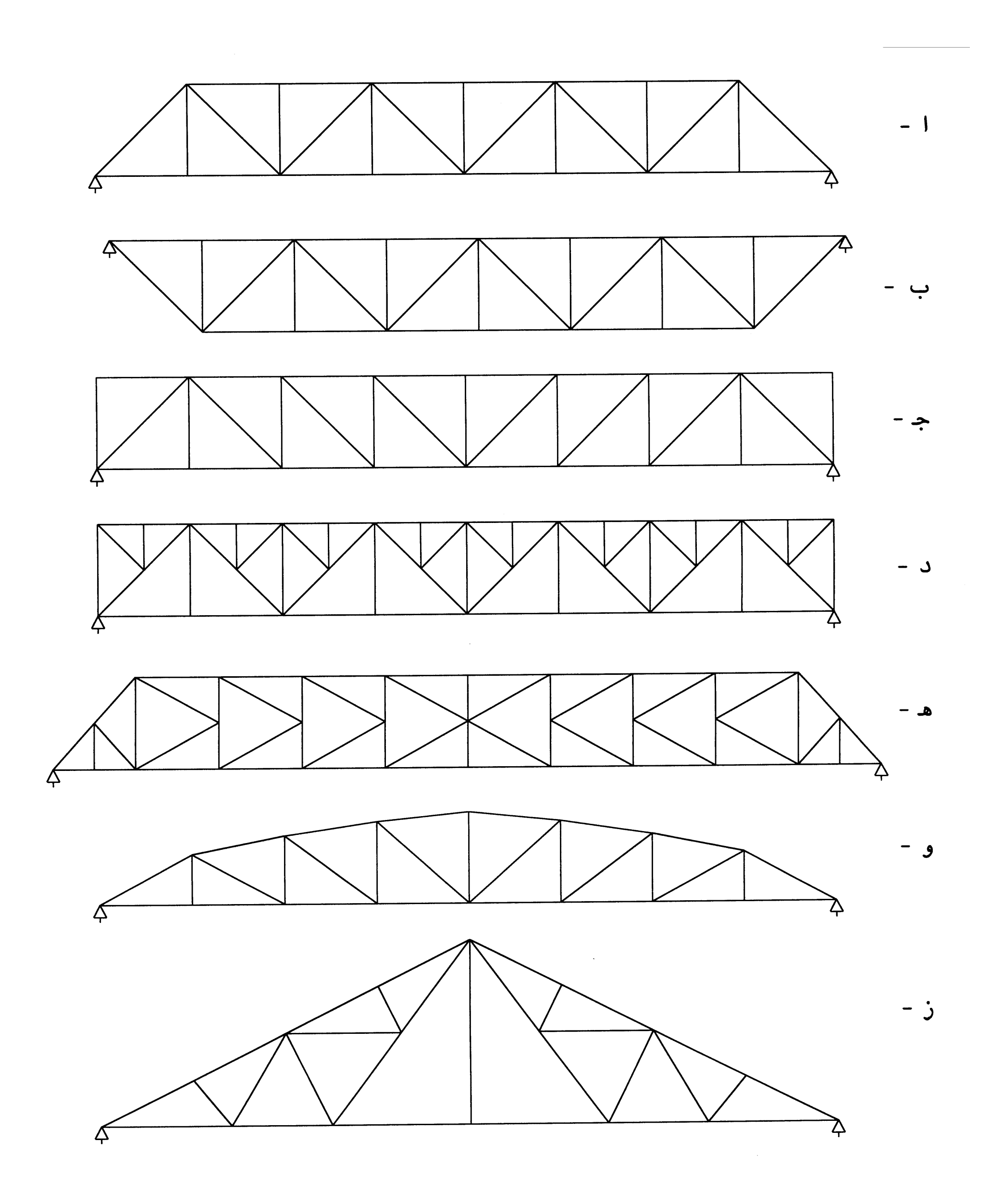
ب- العمق الكلى الكبير المسموح به لهذه الجمالونات يؤدى إلى خفض وزن الجمالون نظرا لأن هذا العمق يكون معظمه مفرغا وذلك بالمقارنة بالنظم الأخرى ذات العمق المصمت (الكمرات اللوحية مثلا).

وتمتاز الكبارى ذات الكمرات الجمالونية بسهولة إنشائها وذلك نظرا لقلة وزن عناصرها وإن كان المظهر الجمالى لهذا النوع من الكبارى موضع جدل وذلك أساسا لتعقيد مسقطة الرأسى وللإتجاهات المتعددة لأعضاء الجمالون.

ويوضح الشكل (١١-١٠) بعض الأنماط الرئيسية والشائعة للكبارى ذات الكمرات الجمالونية والنمط الشائع للإستخدام فى هذه الجمالونات هو نظام الأعضاء المائلة المتعاكسة (Warren) والموضح بالشكلين (١١-١٠-أ) ، (١١-١٠-ب) لكل من الكبارى ذات الكمرات الجمالونية الظاهرة على جانبى الكوبرى (Through) وتلك ذات الكمرات أسفل أرضية الكوبرى (Deck) على الترتيب. ويمتاز النظام المستخدم فى الشكل (١١-١٠-ج) بأن الأعضاء المائلة الطويلة معرضة لقوى الشد فى حين أن الأعضاء الرأسية القصيرة معرضة لقوى الضغط ويسمى هذا النظام بالجمالون على شكل حرف N . ويوضح الشكل (١١-١٠-د) الجمالون ذا الأعضاء المائلة المتعاكسة (Warren) وقد تم تقسيم خلايا الجمالون (Subdivided) لزيادة تدعيم أرضية الكوبرى كما أن هذا التقسيم يستخدم فى بعض الأحيان لتقليل الطول الحر لأعضاء الضغط فى الجمالون وذلك لتخفيض نسبة نحافة هذه الأعضاء (Slenderness ratio) وإن كان هذا التقسيم يؤدى بدورة إلى زيادة تكلفة الجمالون وضعف مظهره الجمالى وزيادة الاجهادات الثانوية المتولدة به فى بعض الحالات. ويعتبر نظام التربيط الداخلى على شكل حرف K والموضح بالشكل (١١-١٠-هـ) مناسبا عندما يكون إرتفاع الباكية (Bay) فى الجمالون فى حدود ضعف عرضها. ويمكن أن يكون الحد العلوى (Top chord) للجمالون مقوسا فى حالة البحور الطويلة كما هو موضح بالشكل (١١-١٠-و) أو مائلا كماهو موضح بالشكل (١١-١٠-ز).

والعناصر الإنشائية للكبارى ذات الكمرات الجمالونيه هى التالية:

١. الكمرات الثانوية الطويلة (Stringers).
٢. الكمرات العرضية (Floor beams) .
٣. الكمرات الجمالونية الرئيسية (Two main trusses) .
٤. أعضاء التربيط العلوية والسفلية (Upper and lower lateral bracing) .
٥. إطارات منع الإزاحة الجانبية (Sway frames) .



شكل (١١-١٠) كبارى جمالونية نمطية

ويتم تصميم الكمرات الثانوية الطولية باعتبارها كمرات بسيطة الارتكاز (Simple beams) ترتكز على الكمرات العرضية او كمرات مستمره كما يتم تصميم الكمرات العرضية باعتبارها كمرات بسيطة الارتكاز على الكمرتين الجمالونيتين الرئيسيتين. أما أعضاء التربيط العلوية والسفلية فيتم تصميمها لتقاوم أحمال الرياح.

ويتم تصميم الكمرات الجمالونية الرئيسية اعتمادا على الفرض بأن نقط التقاء أعضاء الجمالون هى مفصلات وبالتالى فإن هذه الأعضاء تكون معرضة فقط لقوى محورية بشرط أن تكون نقط تأثير الأحمال الواقعة على الجمالون عند المفصلات. وتولد هذه القوى المحورية إجهادات فى أعضاء الجمالون تسمى بالإجهادات الأساسية بينما يمكن أن تتعرض هذه الأعضاء إلى إجهادات أخرى تسمى بالإجهادات الثانوية وهى الاجهادات التى تتولد من عزوم الإنحناء والناتجة من :

أ- عدم تقابل محاور أعضاء الجمالون عند المفصلات فى نقطة واحدة (Eccentricity in connections) .
ب- عزوم الالتواء الناتجة عن كمرات أرضية الكوبرى.
ج- عدم تركز أحمال الجمالون عند نقط المفصلات.
د- جساءة وصلات أعضاء الجمالون بحيث لا يمكن اعتبار هذه الوصلات بمثابة مفصلات.

ويمكن الأخذ بالاعتبارات الاسترشادية التالية عند تصميم الكبارى الحديدية ذات الكمرات الجمالونية :

١- نمط الجمالون والذى يمكن تحديده باعتبار ملاءمة وسهولة التصميم والتنفيذ وأيضا النظرة الجمالية له.
٢- عمق الجمالون والذى يتراوح بين ٨/١ : ٢٠/١ من بحر الجمالون بالنسبة لكبارى الطرق وبين ٥/١ : ١٠/١ من البحر بالنسبة لكبارى السكك الحديدية.
٣- طول باكية الجمالون والذى يتم إختياره بحيث لا يزيد ميل الأعضاء المائلة فى الجمالون على الأفقى عن ٤٥°.

وبالنسبة لتصميم الكبارى المعدنية ذات الكمرات الجمالونية يتم الرجوع إلى الباب الثامن من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية Egyptian code of practice, for steel constructions and bridges) وذلك بالنسبة لتحديد عمق الجمالون والتباعد بين الكمرات الجمالونية الرئيسية (Spacing) والشروط الخاصة بتصميم أعضاء الضغط وأعضاء الشد بالجمالون وأيضا بالنسبة للوصلات.

وأيضا يتم الرجوع إلى الباب التاسع من هذا الكود للشروط والاعتبارات الخاصة بتصميم أرضيات كبارى السكك الحديدية (بند ٩-٣) والشروط الخاصة بتصميم أعضاء التربيط فى الكبارى (بند ٩-٤) .

ويتم الرجوع إلى الباب الحادى عشر من الكود المذكور بالنسبة للتفتيش والصيانة وتقوية الكبارى الحديدية ذات الكمرات الجمالونية.

١١-٨-٥ الكبارى المقوسة Arch Bridges

الشكل المقوس للكبارى يعتبر مناسبا جدا للمضايق (Gorges) العميقة ذات الجسور الصخرية شديدة الانحدار والتى تشكل أكتاف طبيعية تتلقى الضغط الثقيل من أعصاب الكبارى المقوسة. وبدون هذه الظروف الطبيعية فإن الشكل المقوس للكبارى يمثل عبأ يتمثل فى أن إنشاء أكتاف صناعية يتطلب وقتا ومالا كثيرا. ويعتبر الشكل المقوس من الأشكال الجمالية الأكثر جاذبية ويمكن أن يستخدم فى الكبارى الحديدية ذات البحور أكثر من ١٠٠ متر. ويوضح الشكل (١١-١١) نماذج للكبارى الحديدية المقوسة.

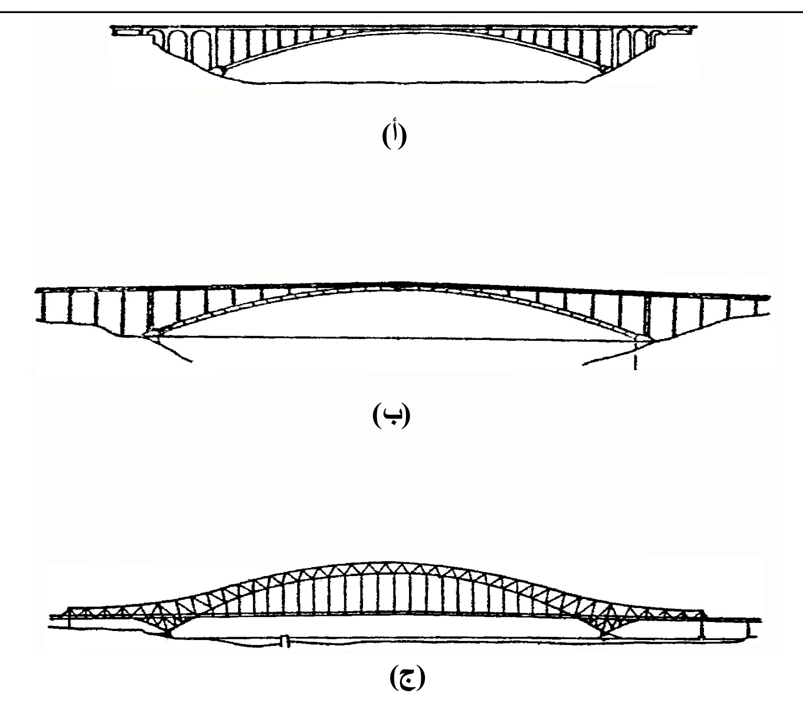
ويتميز الكوبرى المقوس بانخفاض عزوم الإنحناء فى قطاعاته المختلفة مما يؤدى إلى الإقتصاد فى إستخدام الحديد مقارنة بالكوبرى المستقيم المناظر بسيط الارتكاز سواء كان ذا كمرة عاديه أو كمرة جمالونية. ولكن تصنيع وبناء الكبارى المقوسة يكون أكثر صعوبة من الكبارى ذات الكمرات المستقيمة ويجب أخذ هذا فى الاعتبار عند تصميم هذا النوع من الكبارى. ويمكن أن يكون الكوبرى المقوس غير مفصلى (Hingeless) أو أن يحتوى على مفصلة واحدة أو مفصلتين أو ثلاثة مفصلات. وعصب الكوبرى المقوس قد يكون ذا قطاع صندوقى (Box section) أو قطاع أنبوبى (Tubular section) أو على شكل جمالونى.

وحديثا أصبح إستخدام الكبارى المقوسة محدودا بالنظر إلى التقدم الكبير فى الأنماط الحديثة من الكبارى الحديدية الملجمة (Cable stayed bridges) الأكثر إقتصادا وذات الشكل الجمالى المميز.

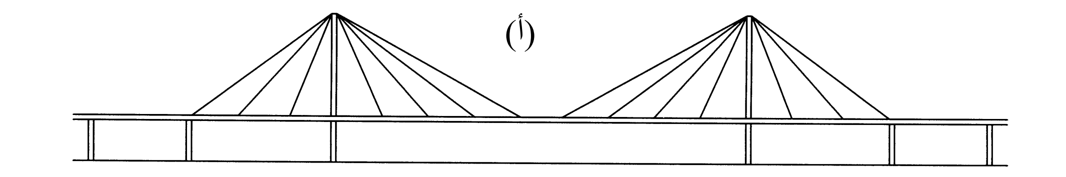
١١-٨-٦ الكبارى الملجمة Cable Stayed Bridges

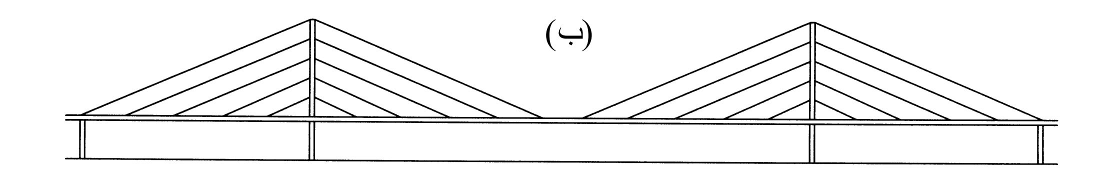
تعتبر الكبارى الحديدية الملجمة مناسبة للبحور التى تزيد عن ٢٠٠ متر وتتميز بإقتصادياتها فى إستخدام الحديد. وبشكل مبسط فإن الكابلات (Cables) المتصلة بأرضية الكوبرى والمربطة بالأبراج (Towers) تتيح الاستغناء عن الركائز المتوسطة مما يسمح بتوفر عرض أكبر للملاحة .

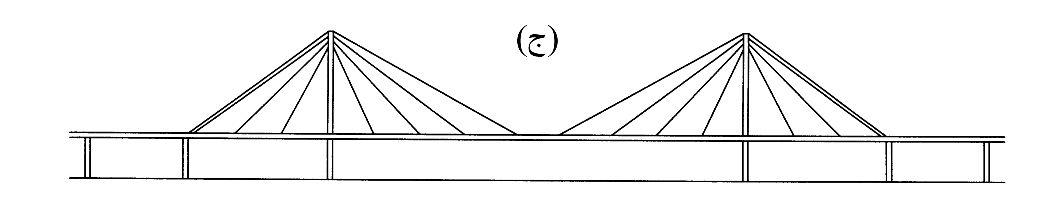
ويمكن حمل أرضية الكوبرى بإستخدام عدد من هذه الكابلات على شكل مروحة (متلاقية على شكل حزمة عند البرج) أو على شكل قيثارة (Harp) (متصلة بالبرج على مستويات مختلفة). وإستخدام عدد من الكابلات يؤدى إلى تقليل المسافات بين نقط الارتكاز لكمرات أرضية الكوبرى مما يؤدى بدوره إلى خفض العمق الإنشائى لهذه الكمرات. ويتم تصميم هذه الكابلات ويتم سبق إجهادها بالأسلوب الذى يجعل الكبارى الملجمة تعمل ككمرات مستمرة على ركائز جاسئة. ونظرا للتأثير الاضمحلالى (Damping effect) للكابلات المائلة فى الكبارى الملجمة فإن هذه الكبارى تكون أقل عرضة للذبذبات الناتجة من قوى الرياح مقارنة بالكبارى المعلقة. ويوضح الشكل (١١-١٢) نماذج للكبارى الحديدية الملجمة. ويمكن وضع الكابلات كلها فى مستوى واحد أو مستويين . ويتميز النظام الأول بأن الربط فى منسوب أرضية الكوبرى يمكن ملاءمته عند تخطيط المرور على الكوبرى بما يسمح بإستخدام أقل عرض مطلوب لأرضية الكوبرى فى حين أن النظام الثانى يقتضى توفير عروض إضافية لأرضية الكوبرى بما يسمح بملاءمة الربط مع الأرضية والأبراج. ومن الناحية الجمالية فإن إستخدام منسوب واحد للكابلات يعتبر أكثر جاذبية حيث أنه يتيح رؤية جانبية غير معاقة للسائر على الكوبرى وفى حالة إستخدام مستويين للكابلات فإن الرؤية الجانبية للكوبرى تعطى الانطباع بأن هذه الكابلات متقاطعة. وعادة ما تكون أرضية الكوبرى الملجم من ألواح (Orthotropic) مع كمرات ذات قطاع صندوقى لمقاومة عزوم الالتواء الناتجة عن القوى المركزة غير المحورية وخاصة فى حالة إستخدام مستوى واحد للكابلات وتكون الكابلات من النوع المجلفن سابق التشكيل والشد (Galvanized preformed prestretched) .



شكل (١١-١١) كبارى حديدية مقوسة نمطية







شكل (١١-١٢) كبارى ملجمة نمطية

وهذه الكابلات تمتلك حماية كبيرة ضد الصدأ ومقاومة متزايدة للاستطالة. وهذه الخاصية الأخيرة لها أهمية كبيرة فى الكبارى الملجمة حيث أن زيادة الاستطالة فى الكابلات تؤدى إلى عزوم إنحناء عالية وهذا بدورة يؤدى إلى زيادة العمق الإنشائى لأرضية الكوبرى.

وميل الكابلات فى الكبارى الملجمة يؤثر على إرتفاع الأبراج. وهذه الأبراج يمكن أن تأخذ واحدا من الأشكال التالية :

أ- عمود مفرد .
ب- زوج من الأعمدة المنفصلة .
ج- إطار .
د- بوابة (Portal frame) .

وبجانب الاعتبارات الإنشائية فإن النواحى الجمالية تلعب دورا أساسيا فى إختيار الشكل المناسب للكوبرى الملجم.

١١-٨-٧ الكبارى الكابولية

الكوبرى الكابولى ذو الفتحة الرئيسية الواحدة يتكون من ذراع اتصال (Anchor arm) عند كل من نهايتيه بين الكتف (Abutment) والدعامة (Pier) ، ذراع كابولى من هذه الدعامة إلى نهاية البحر المعلق وبحر معلق. وهذا النظام يتيح فتحة واسعة للملاحة وأيضا يسهل عملية الإنشاء للكوبرى الحديدى دون الحاجة إلى دعائم لحمل شدة إنشاء الكوبرى من أسفل. وتستخدم الكبارى الكابولية الحديدية ككبارى سكك حديدية نظرا لإرتفاع جساءتها مقارنه بالكبارى المعلقة. ويوضح الشكل (١١-١٣) بعض نماذج للكبارى الكابولية.

وبمقارنة وزن الكوبرى الكابولى والجهد المبذول فى إنشائه بمثيله فى الكوبرى الملجم الذى له نفس البحر يتضح سبب عدم شيوع إستخدام الكبارى الكابولية فى الوقت الحالى.

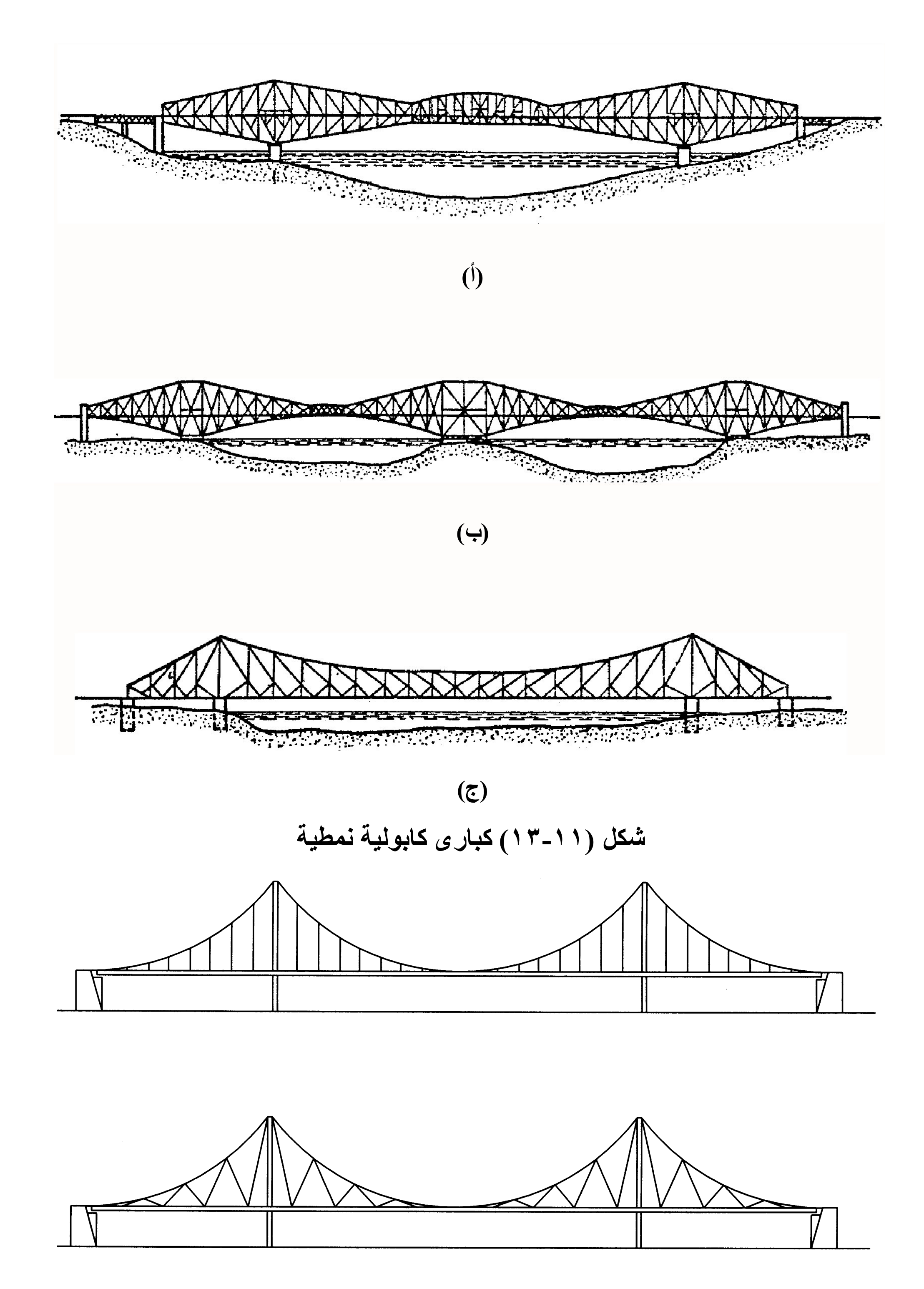
١١-٨-٨ الكبارى المعلقة (Suspension Bridges)

الكبارى الحديدية المعلقة تعتبر الحل الأمثل والوحيد للبحور التى تزيد عن ٦٠٠ متر وتعتبر حلا منافسا للبحور أقل من ٣٠٠ متر.

ويتكون الكوبرى المعلق من العناصر التالية :

أ- كابلات مرنة (Flexible cables).
ب- أبراج (Towers).
ج- أدوات ربط (Anchorage).
د- علاقات (Suspenders).
هـ- أرضية الكوبرى (Deck).
و- جمالونات الجساءة (Stiffening trusses).

ويتكون الكابل عادة من مجموعة من الأسلاك المتوازية من الحديد عالى المقاومة والتى يتم فتلها وضمها فى وحدة واحدة. وكل سلك من هذه الأسلاك يكون مجلفنا ويتم تغطية الكابل بغطاء واق. والأسلاك المكونة للكابل يجب سحبها على البارد وليس على الساخن.



(أ)

(ب)

(ج)

شكل (١١-١٣) كبارى كابولية نمطية

شكل (١١-١٤) كبارى معلقة نمطية

ويجب توجيه اهتمام خـاص بجماليات تصميم أبراج الكبارى المعلقة. وعادة ما تكون هذه الأبراج عالية ومرنة بما يكفى لأن تصمم باعتبار أنها مفصلية من أعلى ومن أسفل. ويجب ربط الكابل من جهتيه بأمان ببلوكات ربط مصمتة قوية (Anchorage blocks) . وتقوم العلاقات (Suspenders) بنقل الحمل من أرضية الكوبرى إلى الكابل. ويتم تصنيع هذه العلاقات من أسلاك عالية الشد وتتكون أرضية الكوبرى المعلق عادة من ألواح (Orthotropic) مقواة بأعصاب أو تجويفات بالإضافة إلى كمرات الأرضية. ويزود الكوبرى بجمالونات الجساءة والتى تتصل مفصليا بالأبراج وتؤدى هذه الجمالونات إلى التحكم فى التحركات الناتجة عن حركة الهواء (Aerodynamics) . وإذا لم تكن هذه الجمالونات كافية فإن ذلك يؤدى إلى حدوث ذبذبات التوائية نتيجة الرياح قد تؤدى إلى انهيار الكوبرى.

ويجب مراعاة دراسة العوامل التالية عند تصميم الكبارى المعلقة :

أ. البحر الرئيسى والبحر الجانبى للكوبرى.
ب. تخطيط مسار الكابل شاملا اتصاله بكمرات أرضية الكوبرى وبالأبراج وبلوكات الربط.
ج. القطاع العرضى لأرضية الكوبرى موضحا عليه ترتيبات حركة المرور.
د. ترخيم الكابل.
هـ. إنشاء وتنفيذ الكابل.
و. العلاقات (Suspenders)
ز. .- جمالونات الجساءة.
ح. شكل وترتيب الأبراج.

واسترشاديا فإنه عادة ما تتراوح نسبة البحر الجانبى إلى البحر الرئيسى بين ٠,١٧ - ٠,٥٠ . وتتوقف نسبة البحر إلى العمق بالنسبة لجمالونات الجساءة على طول البحر فبينما تتراوح بين ٨٥ - ١٠٠ للبحور حتى ١٠٠٠ متر فإنها تصل إلى ١٧٧ للبحور فى حدود ١٣٠٠ متر.

ويجب العناية بتوضيح تفاصيل عرض أرضية الكوبرى بين الكابلات والتى يجب ألا تكون ضيقة جدا. وتتراوح نسبة البحر إلى العرض فى الكبارى المعلقة بين ٢٠ - ٥٦.

ويجب الاهتمام الكامل بدراسة اتزان الكوبرى المعلق فى مواجهة حركة الهواء (Aerodynamic stability) من خلال التحليلات الإنشائية المكثفة وأيضا الإختبارات المعملية على نماذج للكوبرى (Wind tunnel tests) ويوضح الشكل رقم (١١-١٤) الخطوط الرئيسية لمكونات الكوبرى المعلق.

١١-٩ الكبارى الحجرية والكبارى المركبة
Masonry and Composite Bridges

١١-٩-١ الأقواس الحجرية Masonry Arches

الأقواس الحجرية بطبيعتها قوية وتحتاج إلى صيانة بسيطة. وتتضح هذه القوة المدخرة الفطرية فى العديد من كبارى الأقواس الحجرية التى ما تزال باقية فى الخدمة حتى الأن وتتحمل أضعاف الأحمال التى صممت أصلا لتتحملها. وعيب هذه الكبارى الحجرية المقوسة يتمثل فى بطء خطوات إنشائها حيث يتم استخراج الأحجار ونقلها ويتم وضع كل حجر بمكانه بحيث يتوافق مع الأحجار المحيطة به. وباستثناء الكبارى البدائية ذات البلاطة الحجرية المنبسطة فإن معظم الكبارى الحجرية تكون كبارى مقوسة وهذا يضمن عمرا أطول وشكلا جذابا للكوبرى. وتتطلب الكبارى الحجرية المقوسة دعائم وأكتاف جاسئة. ويوضح الشكل (١١-١٥) مكونات القوس الحجرى والذى يتكون من طوب العقد (Voussoirs) والذى

يبدأ متصاعدا من رجل العقد (Skew back) عند منسوب الكتف وحتى مفتاح العقد (Key stone) عند القمة. ويتم ردم الفراغ بين السطح الخارجى للقوس وحتى منسوب الطريق عند قمة مفتاح العقد ليعمل كوسادة وذلك بعمق أدنى لا يقل عن ٩٠ سم ، ويتم بناء حوائط عند نهايتى العقد لسند هذا الردم.

وتتعدد أشكال الأقواس الحجرية لتمثل الأنواع الآتية :

أ- نصف دائرة.
ب- قطع متراصة متجاورة (Segmental).
ج- مسنن (Pointes).
د- نصف قطع ناقص.
هـ- قطع مكافئ.
و- منحنى متعدد المراكز (Multicentered).

ويكون الضغط الأفقى عند منسوب الأكتاف أقل ما يمكن عندما يكون القوس الحجرى على شكل نصف دائرة ويزيد قليلا عندما يكون على شكل نصف قطع ناقص. وتستخدم الأقواس الحجرية على شكل نصف دائرة أو على شكل مسنن عندما يكون إرتفاع القوس كافيا فى حين أن الأقواس الحجرية على شكل قطع متجاورة (Segmental) أو على شكل قطع مكافئ تكون أكثر مناسبة للبحور المتوسطة. وتكون الأقواس الحجرية ذات المنحنى متعدد المراكز أكثر ملائمة للبحور الطويلة فقط.

١١-٩-٢ القواعد الرئيسية لتصميم الكبارى الحجرية المقوسة

يتم فرض الأبعاد الخاصة بالقوس الحجرى استنادا إلى الخبرة ثم يتم التأكد بعد ذلك من ملاءمة هذه الأبعاد عن طريق حسابات التصميم.

ولتوفير أساسات إقتصادية للكبارى ذات الأقواس الحجرية فإن إرتفاع القوس يجب ألا يقل عن ٠,٢٥ البحر وإلا فإن قيمة الضغط الأفقى عند منسوب الأكتاف تكون كبيرة. ويمكن حساب نصف قطر القوس على شكل قطع متجاورة (Segmental) من المعادلة الاسترشاديه التالية مرجع (11-42) :

$$R = \frac{L^2 + 4r^2}{8r} \qquad (11\text{-}14)$$

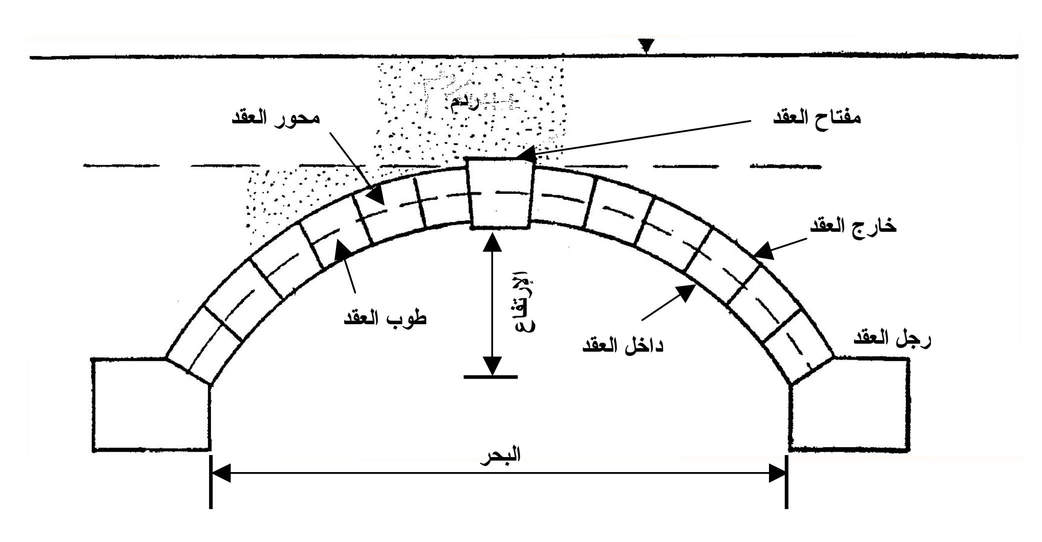
حيث

R = نصف قطر القوس على شكل قطع متجاورة (Segmental)
r = إرتفاع القوس
L = بحر القوس

كما يمكن إستخدام المعادلة التجريبية التالية لحساب سمك القوس من الحجر (d) مرجع (11-42):

$$d = \sqrt{\frac{R + 0.5L}{4}} + 0.06 \qquad (11\text{-}15)$$

حيث تكون وحدات كل من R , L , d بالأمتار الطولية.



شكل (١١-١٥) مكونات القوس الحجرى

وبالنسبة للأقواس من الطوب (Brick masonry) أو الخرسانة العادية فإن قيمة d يجب زيادتها عن تلك الناتجة من المعادلة السابقة بنسبة ٣٣ %.

ولبحور حتى ١٢ متر فإن القوس الحجرى يمكن أن يكون بسمك ثابت. أما بالنسبة للبحور أكثر من ذلك فإن سمك القوس يكون ثابتا فى الثلث الأوسط من البحر ويزيد تدريجيا وبشكل متماثل من الناحيتين بما يتوافق مع توزيع الإجهادات وأيضا النواحى الإقتصادية والجمالية للقوس.

١١-٩-٣ حالة الإجهادات فى الأقواس الحجرية الدائريه مرجع (11-18)

بالنسبة للأقواس الحجرية ذات البحور أقل من ١٢ متر ذات السمك الثابت فإن حالة التحميل بالحمل الحى على أحد جانبى بحر القوس بطول يعادل ٨/٥ من البحر يجب دراستها وأخذها فى الاعتبار.

وبالنسبة للأقواس الحجرية ذات البحور أقل من ١٢ متر وذات سمك متغير فيجب دراسة الإجهادات عند ثلاثة قطاعات حرجة مرتبطة بحالات التحميل للحمل الموزع بإنتظام كما يلى :

موقع القطاع الحرج	حمل موزع بإنتظام يعطى أقصى عزم إنحناء موجب	حمل موزع بإنتظام يعطى أقصى عزم إنحناء سالب
قمة القوس	يغطى الربع الأوسط للبحر	يغطى ٨/٣ البحر من نهايتى البحر
ربع البحر	يغطى ٨/٣ من النهاية المجاورة	يغطى ٨/٥ البحر من النهاية المعاكسة
منسوب الأكتاف	يغطى ٨/٥ من النهاية المعاكسة	يغطى ٨/٣ البحر من النهاية المجاورة

وبالنسبة للبحور التى تزيد عن ١٢ متر فإنه يجب دراسة الإجهادات على كامل طول القوس حيث أن عدد القطاعات الحرجة التى يجب فحصها تتوقف على بحر القوس.

ويجب ألا تتعدى الإجهادات القصوى المحسوبة عند أى قطاع من قطاعات القوس الإجهادات المسموح بها طبقا للمادة المستخدمة فى إنشاء القوس. ويمكن حساب إجهادات التشغيل للحجر (Masonry) كما يلى :

- إجهادات التشغيل فى الضغط = ٠,١٢٥ x أقصى قوة للضغط (Crushing strength)
- إجهادات التشغيل فى القص = ٠,٠٢٥ x أقصى قوة للضغط

حيث تقدر أقصى قوة للضغط (Crushing strength) عن طريق الإختبارات. وفى حالة غياب إختبارات تحديد أقصى قوة للضغط للحجارة فإن القيم التالية يمكن افتراضها كقيم استرشادية (1-11) :

- قطع من الحجارة مع إستخدام مونة أسمنتية ١٤٠ كجم / سم٢ (Cutstone masonry in cement mortar).
- طوب مع إستخدام مونة أسمنتية ٧٠ كجم / سم٢ (Brickwork in cement mortar).
- طوب مع إستخدام مونة جيرية ٤٠ كجم / سم٢ (Brickwork in lime mortar).

١١-٩-٤ طرق التحليل Methods of Analysis

هناك طريقتان يمكن إستخدام إحداهما فى تحليل الأقواس الحجرية :

١- الطريقة المرنة Elastic method .
٢- الطريقة البيانية Graphical method .

وفى كلا الطريقتين فإنه يتم أولا افتراض أبعاد أولية للقوس ثم يتم بعد ذلك مراجعة الاجهادات بالقطاعات الحرجة تحت تأثير حالات التحميل المختلفة.

١١-٩-٤-١ الطريقة المرنة Elastic Method

تتم معالجة الأقواس الحجرية باعتبارها أقواسا مثبتة الطرفين (Fixed arches) ويعتمد التحليل على الفروض التالية :

أ- طول البحر ثابت ولا يتغير.
ب- استمرارية (Continuity) محور القوس وعدم حدوث إزاحة رأسية نسبية بين طرفيه.
ج- ميل محور القوس عند منسوب الأكتاف لا يتغير.

ويتضح من هذه الفروض أن فروق درجات الحرارة والانكماش والتى تتسبب فى تغيير طول البحر سوف تؤدى بالضرورة إلى إضافة إجهادات داخلية فى قطاعات القوس. وأيضا الهبوط النسبى وانزلاق أو دوران الركائز سوف يغير من الإجهادات المحسوبة.

ويمكن حساب قيم الضغط الأفقى وعزم الإنحناء عند قمة القوس والمركبة الرأسية لرد الفعل عند قطاع ما بإستخدام الطرق المختلفة لحساب الإنشاءات أو بإستخدام برامج الحاسب الآلى المتوافرة. كما يمكن الاسترشاد بالمعادلات التالية لتقدير مبدئى لهذه القيم (11-19) :

$$Hc=\frac{\sum_{0}^{L/2}\frac{S}{I}.\sum_{0}^{L/2}\mathrm{MR.y.}\frac{S}{I}-\sum_{0}^{L/2}\mathrm{y.}\frac{S}{I}.\sum_{0}^{L/2}MR\frac{S}{I}}{2.\sum_{0}^{L/2}\frac{S}{I}.\sum_{0}^{L/2}y^{2}\frac{S}{I}-2[\sum_{0}^{L/2}y.\frac{S}{I}]^{2}}\ \mathrm{x}\ \{1-\frac{\sum_{0}^{L/2}\frac{S}{A}.\sum_{0}^{L/2}\frac{S}{I}}{\sum_{0}^{L/2}\frac{S}{I}.\sum_{0}^{L/2}y^{2}\frac{S}{I}-[\sum_{0}^{L/2}y.\frac{S}{I}]^{2}}\}\qquad(11\text{-}16a)$$

$$Mc = \frac{\sum_{0}^{L/2} MR.\frac{S}{I} - 2.Hc.\sum_{0}^{L/2} y.\frac{S}{I}}{2.\sum_{0}^{L/2} \frac{S}{I}} \quad (11\text{-}16b)$$

$$Vc = \frac{\sum_{0}^{L/2} MR.x.\frac{S}{I}}{2.\sum_{0}^{L/2} x^2 \frac{S}{I}} \quad (11\text{-}16c)$$

حيث

Hc = الضغط الأفقى

L = طول البحر

S = طول القطعة من القوس (Segment)

I = عزوم القصور الذاتى المتوسط لقطاع القطعة

MR = عزم الإنحناء حول مركز ثقل القطعة الناتج من أى قوة مؤثرة P

x = المسافة الأفقية بين قمة القوس ومركز ثقل القطعة

y = المسافة الرأسية بين قمة القوس ومركز ثقل القطعة

A = مساحة مقطع قطاع القطعة

Mc = عزم الإنحناء عند قمة القوس

Vc = رد الفعل الرأسى عند قطاع مار بقمة القوس

ويمكن إهمال تأثير تغير درجات الحرارة والانكماش عند تصميم الأقواس الحجرية عندما لا تقل نسبة إرتفاع القوس إلى بحره عن ٠,٣ .

ولإستخدام المعادلات السابقة فى تحليل القوس الحجرى يتم تقسيم القوس إلى عدد من القطع المتساوية (Equal segments) ويتم تجميع قيم المعادلات السابقة للقطع المختلفة. ويمكن تقسيم نصف القوس إلى عدد ٥ قطع فى حالة البحور أقل من ٢٠ متر ويمكن زيادتها إلى عشر قطع للبحور فى حدود ٤٠ متر.

١١-٩-٤-٢ الطريقة البيانية Graphical Method

فى هذه الطريقة يتم التأكد من أن مضلع القوى لنظام الأحمال المؤثرة على القوس الحجرى يؤدى إلى أن خط الضغط (Line of thrust) يقع فى الثلث الأوسط فى أى قطاع من قطاعات القوس على امتداد محوره ولتحقيق ذلك يتم تقسيم القوس الحجرى إلى عدد من القطع المتساوية. ويتم استبدال الأحمال الميتة للقوس ووزن الردم بأحمال مركزة مكافئة. وأيضا يتم تحويل الأحمال الحية الموزعه بأحمال مركزة رأسية مكافئة تضاف إلى الأحمال الميتة. ثم يتم رسم المضلع الحبلى للقوس (Funicular polygon) بحيث يمر بثلاثة نقاط إختيارية (مثل نقطتى الارتكاز عند منسوب الركيزين ونقطة قمة القوس). فإذا مر خط الضغط هذا بالثلث الأوسط لجميع القطاعات على كامل محور القوس كان القوس الحجرى متزنا وإلا تم تغيير النقاط المختارة أو تعديل أبعاد قطاع القوس.

١١-٩-٥ الكبارى المركبة Composite Bridges

المفهوم الواسع للمنشآت المركبة يتضمن أى منشآ يضم عنصرا إنشائيا مكونا من مادتين مختلفتين. وأكثر الأمثلة شيوعا للمنشآت المركبة هى تلك التى تضم كمرات حديدية ترتكز عليها بلاطات من الخرسانة

المسلحة المصبوبة بالموقع أو بلاطات خرسانية مسلحة سابقة الإجهاد ترتكز عليها بلاطات خرسانية مسلحة مصبوبة بالموقع.

وإستخدام نظام المنشآت المركبة فى الكبارى يؤدى إلى توفير فى كميات الحديد قد يصل الى ٦٠ % مقارنة بالكبارى الحديدية ذات الكمرات الحديدية الخالصة. كما أن إمكانية تخفيض العمق الكلى للكمرة بإستخدام المنشآت المركبة يؤدى إلى التوفير فى أطوال المصاعد والمهابط وأيضا التوفير فى أساسات الأكتاف.

وتكون جساءة الإنحناء (Flexural stiffness) للكمرة المركبة مساوية ٢ إلى ٤ مرات جساءة الكمرة الحديدية التى لها نفس العمق وهذا يؤدى إلى تخفيض فى ترخيم (Deflection) واهتزازات هذه الكمرات المركبة. وتتكون الكمرة المركبة من المكونات التالية :

أ- كمرة حديدية جاهزة أو مصنعة (Rolled or built up beam) .
ب- بلاطة خرسانية مسلحة مصبوبة بالموقع.
ج- ناقلات القص (Shear connectors) .

ويكون الحد الأدنى لسمك البلاطة الخرسانية كما هو موضح بالبند ١٠-١-٦-٣ من الباب العاشر من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

كما يكون العرض الفعال لهذه البلاطة طبقا للبند ١٠-١-٦-٧ من هذا الباب.

١١-٩-٥-١ إنشاء الكبارى المركبة Construction

تراعى الاعتبارات الواردة بالبند ١٠-١-١٧ من الباب العاشر من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية عند إنشاء الكبارى المركبة.

١١-٩-٥-٢ ناقلات القص Shear Connectors

عادة ما يتجاوز القص الأفقى على سطح التلامس بين الكمرة الحديدية والبلاطة الخرسانية قوى الالتصاق بين السطحين ولذلك فإنه يجب وضع ناقلات قص حديدية بين السطحين تكون مثبتة بالشفة العلوية للكمرة الحديدية سواء بواسطة اللحام أو المسامير ويتم صب البلاطة الخرسانية المسلحة فوقها. وتوضع هذه الناقلات على مسافات تسمى خطوات الناقلات (Pitch) وتصمم بحيث أن هذه الناقلات تتحمل جميع قوى القص الأفقية بإهمال أى مقاومة احتكاك يمكن أن تتولد بين الكمرة الحديدية والبلاطة الخرسانية. ويوضح الشكل (١١-١٦) بعض أنماط ناقلات القص الشائعة الإستخدام.

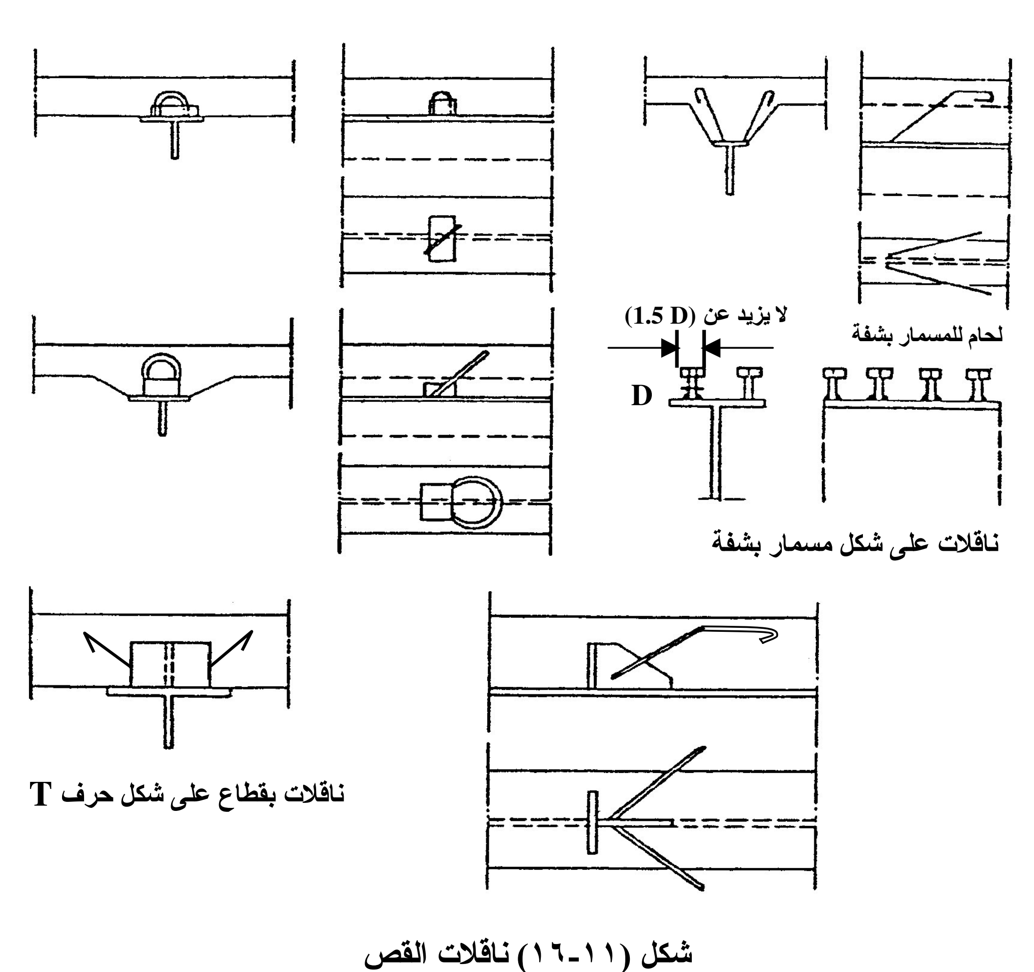
ولتحديد أنواع ناقلات القص وتصميمها من حيث مقاومتها وخطواتها وحجمها وما يتعلق بذلك يمكن الرجوع إلى البند ١٠-١-١٠ من الباب العاشر من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية.

١١-٩-٥-٣ تصميم الكمرات المركبة

يشتمل تصميم الكمرات المركبة على إختيار الأبعاد الأولية للقطاع الحديدى والبلاطة الخرسانية ثم حساب الإجهادات فى القطاع المركب. ويتم حساب هذه الإجهادات (طبقا للكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية بند ١٠-١-٦-٢) استنادا إلى نظرية المرونة بإهمال الخرسانة فى الشد وبافتراض تفاعل كامل (Full interaction) بين القطاع الحديدى والبلاطة الخرسانية فى الضغط. ويمكن إستخدام

طريقة حالات الحدود (Ultimate load design) بموافقة خاصة من الجهة المالكة للمنشأ على أن يكون التصميم بهذه الطريقة مأمونا تماما.

ويتم الرجوع إلى البند ١٠-١-٨ من الباب العاشر من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية لتحديد توزيع الإجهادات فى القطاع المركب. كما يتم الرجوع إلى البند ١٠-١-٩ من هذا الباب فيما يختص بمنع الشروخ فى القطاع المركب وإلى البند ١٠-١-١٢ فيما يتعلق بالترخيم (Deflection) وإلى البند ١٠-١-١٤ فيما يتعلق بتأثير الزحف وإلى البند ١٠-١-١٥ فيما يتعلق بتأثير الانكماش وإلى البند ١٠-١-١٦ فيما يتعلق بتأثير درجات الحرارة.



شكل (١١-١٦) ناقلات القص

١١-١٠ الكبارى المؤقتة والكبارى المتحركة
Temporary and Movable Bridges

١١-١٠-١ الكبارى المؤقتة Temporary Bridges

الكبارى المؤقتة هى تلك الكبارى التى يتم الاحتياج إليها كوسيلة مؤقتة لعبور العوائق فى الحالات التى لا يكون بناء كبارى مستديمة فيها أمرا متيسرا نتيجة نقص الموارد أو الرغبة فى سرعة إنشاء الكوبرى. وغالبا ما يتم الاحتياج إلى جسور تحويلية مؤقتة أثناء إصلاح أو تقوية أحد الكبارى الدائمة. ويقدر العمر الافتراضى للكوبرى المؤقت بحوالى عشر سنوات.

ونتيجة قابلية الكبارى الخشبية للتعفن والتلف فإن هذه الكبارى يمكن تصنيفها ككبارى مؤقتة.

١١-١٠-٢ الكبارى الخشبية Timber Bridges

تكمن الميزة الوحيدة للكبارى الخشبية فى رخص تكلفتها مقارنة بالمواد الأخرى المستخدمة فى الكبارى المؤقتة وخاصة عند توافر الخشب ورخص أجور العمالة الماهرة. وتمثل الكبارى الخشبية أقل مستوى من ناحية المتانة والدوام وأيضا من جهة مقاومتها للحريق مقارنة بالمواد الأخرى المستخدمة فى المنشآت. وفى ضوء حركة المرور الحديثة ونظمها فيما يتعلق بعرض حارات المرور وعددها وغيرها فإن الكبارى الخشبية (وخاصة ذات الطراز الجمالونى) قد توقف إستخدامها ككبارى دائمة. وعند توافر ظروف مناسبة فإن كبارى خشبية ذات بحور فى حدود ٥ أمتار يمكن إستخدامها من وجهة النظر الإقتصادية ككبارى مؤقتة على أن تتوافر لها الصيانة اللازمة ويتم استبدالها بعد مرور ١٥ سنه على بنائها. وبالتالى فإنه عندما يتقرر إستخدام كوبرى خشبى فى موقع ما فإن دراسة دقيقة يجب إجراؤها لمعرفة مدى مناسبة إنشاء مثل هذا الكوبرى فى الموقع المقرر على أن تشتمل هذه الدراسة على النقاط التالية :

١- المواد وتتضمن نوع ومرتبة الخشب المتوافر وأنواع المواد التى سوف تستخدم فى الوصلات.
٢- العمر الافتراضى المطلوب للكوبرى.
٣- الأحمال التى سوف يتعرض لها الكوبرى.
٤- مدى توافر العمالة الماهرة اللازمة.
٥- طرق ووسائل الإنشاء.
٦- الظروف البيئية السائدة فى موقع الكوبرى.

والخشب المستخدم فى الكبارى الخشبية يجب أن يكون مجففا جيدا حيث أن الخشب الأخضر (النيئ) سوف يفقد وزنه وينكمش ويتشقق وينفتل (Warp) مع مرور الزمن بفعل الجفاف. ويجب أخذ هذه الظواهر فى الاعتبار عند تصميم الكبارى الخشبية. وتتوقف بحور الكبارى الخشبية على الأحجام والأطوال المتوافرة لقطع الخشب. وتمثل معاينة الموقع وتحديد أجور الصناعة (Workman ship) أمورا أساسية عند إنشاء كوبرى خشبى.

١١-١٠-٢-١ إجهادات التشغيل للأخشاب المستخدمة فى الكبارى

تتوقف هذه الإجهادات على نوع الخشب المستخدم ومدى تجفيفه ونسبة الرطوبة به. ويجب إجراء إختبارات معملية لتحديد هذه الإجهادات لنوع الخشب المقرر إستخدامه فى إنشاء الكوبرى. ويمكن الرجوع إلى القيم التالية كقيم استرشادية لخصائص الأخشاب المستخدمه فى إنشاء الكبارى مرجع (11-42)على أن يقتصر إستخدامها على التصميم الأولى المبدئى للكوبرى.

- وزن وحدة الحجوم عند محتوى رطوبة ١٢ % يتراوح بين ٥٠٠ - ١٠٠٠ كجم / م٣ .
- إجهـــــاد الشـــد والإنحـــناء فى الإتجاه المــــــوازى للتعريق (التجزيع Grain) يتـــراوح بين ٦٠ - ١٥٠ كجم/سم٢ .
- إجهاد القص يتراوح بين ٤ - ١٣ كجم / سم٢ .
- إجهاد الضغط فى الإتجاه الموازى للتعريق (التجزيع Grain) يتراوح بين ٤٠ - ١٠٠ كجم / سم٢ .
- إجهاد الضغط فى الإتجاه العمودى على التعريق يتراوح بين ١٠ - ٥٠ كجم / سم٢ .

ويتضح من هذه القيم الاسترشادية أن مقاومة الخشب فى إتجاه التعريق أكبر منها فى الإتجاه العمودى على التعريق. ولذلك فإنه يجب (ما أمكن ذلك) أن يوضع الخشب فى جسم الكوبرى بحيث تكون الإجهادات القصوى المؤثرة عليه فى إتجاه التعريق. وعندما تكون الأحمال المؤثرة على الكوبرى مائلة بزاوية ما على إتجاه التعريق فإن إجهاد التشغيل على السطح المائل يمكن حسابه من معادلة Hankinson التالية (11-17) :

$$N = \frac{P\,Q}{P\,Sin^2\,\alpha + Q\,Cos^2\,\alpha} \qquad (11\text{-}17)$$

حيث

N = وحدة الإجهاد المسموح به على السطح المائل

P = وحدة إجهاد الضغط فى الإتجاه الموازى للتعريق

Q = وحدة إجهاد الضغط فى الإتجاه العمودى على التعريق

α = الزاوية المحصورة بين إتجاه الحمل المؤثر وإتجاه التعريق

١١-١٠-٢-٢ الأجزاء المعدنية (الحدايد) المستخدمه فى الكبارى الخشبية Hardware

دائما ما تمثل مقاومة الوصلات (Connections) فى المنشآت الخشبية النقطة الضعيفة فى المنشأ ولذلك فإن المجهود الأكبر فى التصميم فى غالبية الحالات يتركز فى توضيح التفاصيل السليمة والمناسبة الخاصة بالوصلات بين أعضاء المنشأ الخشبى.

وتتضمن الأجزاء المعدنية المستخدمه فى الكبارى الخشبية ما يلى :

- مسامير القلاووظ والصواميل بالورد (Bolts and nuts with washers) .
- مسامير غاطسة (Drift bolts) .
- مسامير برغى (Screws) .
- رزز (Spikes) .
- حلقات مفتوحة (Split rings) .

ويتم إستخدام مسامير القلاووظ المزودة بوردتين على الأقل بحيث يكون قطر الوردة مرتين ونصف قطر المسمار القلاووظ.

وبالنسبة للمسامير الغاطسة فهى عبارة عن قطع حديدية أسطوانية بدون رؤوس يتم وضعها داخل ثقوب معدة فى الخشب ذات قطر مساو ٠,٨ قطر المسمار الغاطس المستخدم. ولتثبيت قطعتين من الخشب بواسطة رزز (Spikes) فيتم عمل ثقوب ذات قطر أقل قليلا من حجم الرزز فى أحد القطعتين بإستخدام مثقاب الخشب (Auger) ثم يتم دفع الرزز داخل هذه الثقوب لتشق لها طرقا داخل القطعة الأخرى.

ويتم إستخدام الحلقات المفتوحة (Split rings) ذات المقطع المستطيل فى التثبيت بإدخالها داخل تجاويف مقطوعة مسبقا فى سطح الخشب وبحيث يكون نصف عمق الحلقة فى التجويف الخاص بكل من القطعتين المراد تثبيتهما.

ولمقاومة احتمال حدوث صدأ الحديد فإن أقل قطر للمسامير القلاووظ يمكن إستخدامه فى الكبارى الخشبية هو ١٦ مم فى الأجزاء المعرضة للظروف الجوية العادية ولا يقل عن ٢٥ مم فى الأجزاء المعرضة لبيئة بحرية. وعند إستخدام ألواح من الصلب الطرى العادى فى الوصلات فإن السمك الأدنى لهذه الألواح يجب ألا يقل عن ٦ مم فى الظروف الجوية العادية وعن ١٢ مم فى الظروف البيئية البحرية.

١١-١٠-٢-٣ كبارى الطرق الخشبية Timber Road Bridges

تصمم الكبارى الخشبية لتقاوم أحمالا لا تتضمن الصدم (Impact) ولذلك فهى لا تصلح ككبارى للسكك الحديدية. ويمكن إنشاء كبارى الطرق الخشبية بإستخدام كمرات طولية (Stringers) تمتد بين الأكتاف (Abutments) وذلك فى حالة البحور القصيرة حتى ٦ متر أما إذا زادت البحور عن ذلك فيمكن إستخدام كمرات جمالونية (Trusses) .

وتتكون أرضية الكوبرى الخشبى من ألواح خشبية سميكة (Planks) ترتكز على كمرات طولية ويمكن تصميم هذه الألواح الخشبية ككمرات مستمرة. وتغطى هذه الألواح طبقة أخرى من الألواح الخشبية المتعامدة الإتجاه لتتحمل البرى الناتج من حركة المرور على الكوبرى (Wearing) ويتم تصميم الكمرات الطولية باعتبارها كمرات بسيطة الارتكاز بين عتبتين (Transoms) وبصفة عامة يتم تصميم أرضية الكوبرى بجميع مكوناتها (الألواح الخشبية الطولية والألواح الخشبية العرضية والكمرات الطولية) بحيث لا يتجاوز الهبوط الأقصى للأرضية (Deflection) ٣٠٠/١ من بحر الكوبرى. ويجب ترك معامل آمان وافر لتآكل أرضية الكوبرى وذلك بزيادة سمك الألواح الخشبية العرضية والذى يمكن تقديره بدراسة سلوك الكبارى الخشبية المماثلة تحت تأثير حركة المرور. ويتم تصميم الكمرات الجمالونية الرئيسية للكوبرى بدراسة الحالات القصوى للتحميل وحساب القوى المحورية فى الأعضاء المختلفة للجمالون. وعادة ما يكون قطاع كل من العارضتين الأفقيتين العلوية والسفلية (Upper and lower chords) ثابتا ويتم تصميمه على القوة القصوى بكل منهما وذلك لصعوبة تغيير القطاع من باكية إلى أخرى ويجب الأخذ فى الإعتبار زيادة مساحة القطاع المصمم بمقدار الثلث تقريبا لتعويض النقص فى مساحة القطاع عند القطع منه فى أماكن الوصلات ويتم ترتيب الأضلاع المائلة فى الجمالون بحيث تتعرض لقوى ضغط ويتم تصميمها من قطاعات خشبية بينما تكون الأعضاء الرأسية معرضة لقوى شد ويتم تصميمها من أسياخ حديدية (Steel rods) .

١١-١٠-٣ الكبارى العسكرية Military Bridges

أثناء العمليات فى حالة الحرب يضطر المهندسون العسكريون إلى بناء كبارى لعبور الأنهار والعوائق الأخرى عندما لا تتوافر هذه الكبارى أو عندما تتحطم الكبارى القائمة. ويمكن تصنيف الكبارى العسكرية إلى نوعين رئيسيين :

أ- كبارى ثابتة لعبور مجرى مائى ضيق أو عائق ما.
ب- كبارى عائمة.

وتختلف الكبارى العسكرية عن الكبارى المدنية فى أن الأولى يتم تصميمها لتتوافر فيها شروط التنفيذ السريع بأقل عمالة ممكنة وأيضا الفك السريع وسهولة النقل والتخزين. ولذلك فإن التصميم الأمثل لهذه الكبارى يجب أن يتكون من وحدات صغيرة خفيفة سابقة التصنيع ذات أبعاد قياسية معقولة (Standardized)

١١-١٠-٤ الكبارى العائمة Floating Bridges

تستخدم الكبارى العائمة منذ القدم كوسيلة عبور مؤقتة للأنهار. وتختص الكبارى العائمة بمميزات رئيسية عن الكبارى الثابتة تتمثل فى :

أ- أسرع فى الإنشاء.
ب- يمكن بناؤها عندما يكون قاع النهر غير صالح لدق الدعائم (Piers) لكوبرى ثابت.

والمتطلبات الأساسية للكوبرى العائم تتمثل فى :

١- يجب أن يتكون من أقل عدد ممكن من العناصر اللازمة لإنشاء الكوبرى.
٢- يجب أن تكون عناصر الكوبرى قابلة للتغيير والاستبدال.
٣- يجب أن يكون حجم ووزن كل عنصر بحيث يسمحان بتداوله (Handling) يدويا مع سهولة نقله.
٤- الزمن اللازم لبناء وفك الكوبرى يجب أن يكون قصيرا.
٥- المواد المستخدمة فى بناء الكوبرى يجب أن تكون قوية ومتينة وغير قابلة للصدأ.
٦- يجب تزويد نهايتى الكوبرى بمنحدرات (Ramps) مصممة بعناية لضمان اتصالها الدقيق بالجسرين على الجانبين فى الحالات المختلفة لإرتفاع وانخفاض منسوب المياه.
٧- يجب أن يكون إرتفاع جسم الكوبرى فوق منسوب سطح الماء منخفضا .
٨- استبدال الأجزاء التالفة فى الكوبرى يجب أن يكون سهلا وسريعا.

وتتكون الكبارى العائمة الحديثة من جزئين رئيسيين :

أ- الدعائم العائمة.
ب- جسم الكوبرى.

وتوضع الدعائم العائمة على مسافات منتظمة على طول الكوبرى وبحيث يكون المحور الرئيسى للدعامة العائمة موازيا لإتجاه التيار فى النهر حيث توفر هذه الترتيبات الاحتياطيات اللازمة للطفو لمنع غرق الكوبرى عند تحميله بالحمل الحى. والدعامة العائمة إما أن تكون من نوع جاسئ (Rigid type) مثل قارب ذى قاع مفلطح أو من نوع منفوخ بالهواء (Pneumatic) . وهذا النوع الأخير والذى تزايد إستخدامه لأفضليته عن النوع الأول الجاسئ يتكون من مواسير (Tubes) ذات نسيج مطاطى يتم نفخها بالهواء قبل إستخدامها.

ويمثل جسم الكوبرى الطريق ويتم تصميمه ليعمل كعنصر واحد مستمر عند توصيل أجزائه كلها ببعض. وبذلك فإن حمل أى مركبه تعبر فوق الكوبرى يتم مقاومته بواسطة دعائم الجزء الذى ترتكز عليه المركبة وأيضا دعائم الجزئين الملاصقين لهذا الجزء مما ينتج عنه دعائم إقتصادية.

وفى التصميمات الحديثة للكبارى العائمة فإن جسم الكوبرى يتكون من كمرات ذات قطاع صندوقى مصنعه من سبائك الألومنيوم وترتكز هذه الكمرات على دعائم عائمة ذات نسيج مطاطى منفوخة بالهواء ويتم ربط هذه الكمرات فى منتصف المسافة بين الدعائم لتوفير الاستمرارية اللازمة لجسم الكوبرى.

وتمثل المسافات بين الدعائم العائمة عاملا هاما فى تصميم الكبارى العائمة حيث أن تقارب هذه الدعائم يعوق حركة الحطام العائم فى النهر ويسبب ضررا للكوبرى كما أن تباعد هذه الدعائم يقتضى زيادة قوة تحمل جسم الكوبرى ودعائمه مما ينتج عنه زيادة حجم عناصر الكوبرى ويترتب على ذلك صعوبات فى حمل ونقل وبناء مكونات الكوبرى. وبالتالى فإن تصميم الكوبرى العائم يجب أن يتوافر فيه التوازن بين أقصى قوة تحمل للكوبرى مع أقل وزن ممكن له مع التأكيد على سهولة نقل مكوناته وسرعة تركيبها بإستخدام أقل عدد من العمالة. كما يجب التأكد من الربط الجيد للدعائم العائمة فى كل من ضفتى النهر لضمان استقامة محور الكوبرى وعدم تأثره بتيارات النهر.

وتوجد عدة طرق لتشييد الكبارى العائمة طبقا لطبيعة الموقع وظروفه والمعدات المستخدمة فى التشييد وتتمثل هذه الطرق فيما يلى :

١- طريقة الدعائم العائمة المتعاقبة

وتعتبر هذه الطريقة أسهل طريقة لتشييد الكبارى العائمة وخاصة فى مجارى الأنهار الضيقة وغير العميقة. وفى هذه الطريقة يتم تعويم الدعائم العائمة بالتعاقب عند الطرف البعيد من الكوبرى ثم يتم إضافة الطريق فوق هذه الدعائم.

٢- طريقة أجزاء الكوبرى المتعاقبة

وفيها يتم بناء أجزاء كاملة من الكوبرى كل جزء فوق دعامتين عائمتين وذلك على الجسر القريب ثم يتم تعويم هذه الأجزاء وقطرها لمكانها ثم ربطها ببعضها. ويتم إتباع هذه الطريقة لإنشاء الكبارى العائمة فى مجارى الأنهار العريضة وذات العمق الكبير.

٣- طريقة الدفع للخارج Booming Out

وفى هذه الطريقة يتم وضع الدعائم العائمة على الشاطئ ويتم بناء جزء من الكوبرى عليها ثم دفعه إلى الماء. وتضمن هذه الطريقة حماية جسم الكوبرى من الأضرار عند الدفع للطرف البعيد من الكوبرى. وتستخدم هذه الطريقة للكبارى العائمة خفيفة الوزن.

٤- طريقة الكوبرى المتحرك Swinging Full Bridge

وفى هذه الطريقة يتم بناء الكوبرى بالكامل على الضفة القريبة ثم يتم تحريكه فى الماء ثم ربطه.

١١-١٠-٥ الكبارى البونتونية Pontoon Bridges

تستخدم الكبارى البونتونية ككبارى مؤقتة عبر الأنهار العريضة المجرى. وفى هذا النوع من الكبارى فإن دعائم عائمة خاصة (مثل الصنادل أو القوارب) موضوعة على مسافات متقاربة تشكل الجزء السفلى من الكوبرى (Substructure) . ويتكون جسم الكوبرى من كمرات جمالونية (Trussed beam) وألواح خشبية سميكة عريضة يتم تحميلها فوق الدعائم العائمة. ويجب العناية الخاصة بربط الكوبرى بضفتى

النهر مع الأخذ فى الاعتبار إرتفاع وانخفاض منسوب المياه فى النهر. وفى الكبارى البونتونية الحديثة يتم إستخدام دعائم مطاطية منفوخة بالهواء بدلا من الصنادل الخشبية أو المعدنية.

١١-١٠-٦ الكبارى المتحركة Movable Bridges

تستخدم الكبارى المتحركة على القنوات أو المجارى المائية التى تحتم فيها متطلبات الملاحة وجود خلوص رأسى كبير بين منسوب سطح الماء وأسفل أرضية الكوبرى فى الحالات التى يكون من غير المناسب فيها رفع منسوب الطريق للحد المطلوب من وجهة نظر التكاليف وأيضا حركة المرور على هذا الطريق. ومعظم الكبارى المتحركة هى كبارى سكك حديدية حيث أن بناء كبارى عالية ثابتة توفر خلوصا رأسيا كبيرا ضروريا لمقتضيات الملاحة يتضمن حتما مصاعد ومهابط (Approaches) طويلة ومكلفة جدا لتلائم الميول الخاصة المطلوبة لحركة القطارات.

وتشتمل الكبارى المتحركة على الأنماط التالية :

أ- كوبرى الدوران Swing bridge .

ب- الكوبرى المفتوح Bascule bridge .

ج- الكوبرى الذى يتم رفعه رأسيا Lift bridge .

د- الكوبرى الناقل Transporter bridge .

وتمثل هذه الأنماط من الكبارى المتحركة منشآت ذات طبيعة خاصة يتم تصميمها بإعطاء عناية خاصة للمعدات والآلات التى سيتم إستخدامها أثناء تشغيل الكوبرى وتخزين هذه المعدات والآلات وطريقة تشغيلها وصيانتها. وفى حالة إمكانية إستخدام سبيكة الألومنيوم فى بناء هذه الأنماط من الكبارى المتحركة فإن هذا سوف يؤدى إلى توفير كبير فى وزن هذه المنشآت مما ينعكس أثره على التوفير فى الطاقة اللازمة لتشغيل هذه الكبارى.

١١-١٠-٦-١ كوبرى الدوران Swing Bridge

يتكون هذا الكوبرى من كمرة جمالونية مستمرة ذات بحرين متجاورين متساويين ومرتكزة عند منتصفها على نظام أفقى من التروس الدوارة والذى يتم تثبيته بدوره على ركيزة تقع فى منتصف المجرى المائى. وفى حالة عدم تساوى البحرين فى الكمرة المستمرة فإنه يتم تزويد البحر القصير بوزن إضافى لمعادلة فرق وزن البحر الطويل. ويتسبب كوبرى الدوران فى تقليل القدرة الملاحية للمجرى المائى حيث تتسبب الركيزة الوسطى لهذا الكوبرى فى تقسيم المجرى المائى العريض إلى مجريين ضيقين وأيضا إعاقة تدفق المياه وانحراف التيار جهة الضفتين. ويجب أن يدور الكوبرى بزاوية ٩٠° ليسمح بمرور المراكب حتى الصغيرة منها. ولذلك فإن عملية الدوران تستغرق وقتا طويلا كما أن حركة المرور الأرضى عند حافة المجرى المائى تكون غير مأمونة أثناء عملية الدوران. لهذه الأسباب فإن هذا النوع من الكبارى المتحركة غير مفضل.

١١-١٠-٦-٢ الكوبرى المفتوح Bascule Bridge

يتم فتح هذا الكوبرى إذا تكون من بحر واحد (Single span) بدورانه فى الإتجاه الرأسى حول نقطة ارتكازه . وإذا تكون الكوبرى من بحرين فإن كل بحر يتم فتحة بدورانه رأسيا حول نقطة ارتكازه حيث يتميز الكوبرى فى هذه الحالة بسرعة دوران البحرين الصغيرين مقارنة بزمن دوران البحر الواحد الطويل بالإضافة إلى صغر الوزن المعادل اللازم لدوران الكوبرى فى هذه الحالة.

ويتميز الكوبرى المفتوح (Bascule bridge) عن كوبرى الدوران (Swing bridge) بسرعة دوران الأول كما أن الفتح (الدوران) فى الكوبرى المفتوح يمكن أن يكون جزئيا فقط لمرور المراكب الصغيرة أو كليا لمرور الناقلات الكبيرة.

١١-١٠-٦-٣ الكوبرى المرفوع رأسيا Lift Bridge

يتم إستخدام هذا النوع من الكبارى المتحركة عندما يتطلب الأمر توفير خلوص للملاحة فى المجرى المائى. ولتشييد هذا الكوبرى يتم بناء برجين على ضفتى المجرى المائى. ويتكون الطريق عادة من كمرات جمالونية يتم ربطها من الجانبين بكابلات تمر فوق بكرات مثبتة فى أعلى البرجين وتتصل هذه الكابلات فى طرفها الأخر بأوزان معادلة (Counter weights) . ويتم رفع الطريق إلى أعلى رأسيا ليسمح بالملاحة فى المجرى المائى. ويتفوق هذا الكوبرى على الكوبرى المفتوح بسهولة حركته ورخص ثمنه للبحور الطويلة.

١١-١٠-٦-٤ الكوبرى الناقل Transporter Bridge

يستخدم الكوبرى الناقل فى الموانى لنقل الأشخاص والمواد عبر القنوات المائية. ويتكون هذا الكوبرى من برجين يصل بينهما كمرة جمالونية. ويتعلق من هذه الكمرة قفص متحرك (Moving cage) بواسطة أسلاك ببكرات تتحرك بطول العارضة السفلية للكمرة الجمالونية. ويصنف هذا النوع من الكبارى كمعدية (Ferry) أكثر منه كوبرى.

١١-١١ الجزء السفلى للكوبرى Substructure

١١-١١-١ تعريف

جزء الكوبرى من أسفل منسوب الارتكاز وحتى أعلى الأساسات يطلق عليه الجزء السفلى للكوبرى (Substurcutre) . ومن ثم فإن هذا الجزء السفلى من الكوبرى يتكون من الدعامات (Piers) والأكتاف (Abutments) وكراسى الكوبرى (Bed blocks) المرتكزة على الدعامات والأكتاف.

١١-١١-٢ كرسى الكوبرى Bed Block

كرسى الكوبرى (Bed block or bridge seat) هو الكتلة أو القالب المرتكز على أعلى الدعامة أو الكتف ويمثل سطح الارتكاز المباشر للجزء العلوى من الكوبرى (Superstructure) ويستخدم فى توزيع الأحمال على الدعامة أو الكتف بصورة أكثر انتظاما. ويجب أن يغطى كرسى الكوبرى كامل مساحة مقطع أعلى الدعامة ويمتد خارجها من جميع الإتجاهات. ويمنع هذا الامتداد مياه الأمطار من إغراق جوانب ونهايات الدعامة ويحسن من شكل الدعامة. و يمكن تصميم كرسى الكوبرى من الخرسانة المسلحة بسمك وبتسليح فى الإتجاهين يتم حسابهما من التحليل الإنشائى.

١١-١١-٣ المواد المستخدمة فى دعامات وأكتاف الكبارى

تبنى دعامات وأكتاف الكبارى من الحجارة أو الخرسانة الكتلية (Mass concrete) أو الخرسانة المسلحة. والدعامات والأكتاف المبنية من الحجارة تستخدم فيها إما أحجار مع مونه أسمنتية أو أن تتكون الدعامة من طبقة خارجية من الأحجار تملأ من الداخل بخرسانة كتلية مع استخدام أحجار ربط بين الإثنين.

. ومن أنواع الأحجار المناسبة للإستخدام فى إنشاء الدعامات والأكتاف النوع المعروف بأحجار الدقشوم أو الدبش من الرتبة الأولى (First class) . ويعد إستخدام الخرسانة فى إنشاء الدعامات والأكتاف إقتصاديا عندما لا تتوافر الأحجار الصالحة الكافية والعمالة الفنية الماهرة لإستخدام الأحجار.

وفى حالة إستخدام الخرسانة الكتلية فإنه يمكن إضافة الأحجار بمقاسات من ١٠٠ - ١٥٠ مم إلى هذه الخرسانة كركام وذلك لتخفيض تكاليف هذه الخرسانة على ألا تتعدى النسبة المئوية لحجم هذه الأحجار ٢٠ % من الحجم الكلى للخرسانة الكتلية مع العناية بوضع هذه الأحجار فى الخرسانة بحيث لا يزيد التباعد بينها عن ٣٠٠ مم.

ويجب تقدير مقاومة مادة البناء للدعامات والأكتاف فى الضغط والشد بإجراء الإختبارات المناسبة ويمكن إستخدام القيم التالية كقيم استرشادية فى التصميم المبدئى الأولى للدعامات والأكتاف من الحجارة لحين إجراء الإختبارات المعملية اللازمة.

جدول (١١-٨)

المادة المستخدمة	المقاومة القصوى للضغط (كجم / سم^٢)	المقاومة القصوى للشد (كجم / سم^٢)
١- دبش من الجرانيت مع مونه أسمنتية	١٤٠	٢٨
٢- طوب (Sound brick) مع مونه أسمنتية	٧٠	١٤
٣- طوب (Sound brick) مع مونه جيرية	٤٠	٨

١١-١١-٤ الدعامات Piers

يتوقف شكل وملامح دعامة الكوبرى إلى حد كبير على نوع وحجم وأبعاد الجزء العلوى للكوبرى (Superstructure) كما يتوقف أيضا على البيئة أو الوسط الذى سيتم بناء الدعامة فيه. وتتنوع أنماط الدعامات بين النمط المصمت والنمط ذو التجاويف (Cellular) والنمط ذو الأعمدة (Trestle) والنمط المطرقى (Hammer head).

بالإضافة إلى هذه الأنماط فإنه يمكن إستخدام تصميمات أخرى من الدعامات مثل الهياكل الخرسانية المسلحة .

وفى حالة الكبارى فوق الأنهار فإن الدعامات المصمته والدعامات ذات التجاويف تزود بقاطع مياه نصف دائرى (Semicircular cut water) لتسهيل حركة تيار المياه وتقليل النحر. وتبنى الدعامات المصمته من الحجارة (Masonry) أو من الخرسانة الكتلية. كما يمكن إستخدام الحجارة للأجزاء المكشوفة مع ملء الأجزاء الداخلية بخرسانة فقيرة (Lean concrete) ويؤدى هذا إلى توفير نفقات الشدات وتحسين شكل الدعامة وفى هذه الحالة يجب ربط طبقات الحجر الخارجية بالخرسانة الداخلية بعناية بإستخدام أحجار ربط (Bond stones) .

وتستخدم الخرسانة المسلحة فى أنماط الدعامات ذات التجاويف (Cellular) وذات الأعمدة (Trestle) والمطرقية (Hammer head) . وتؤدى الدعامات ذات التجاويف إلى التوفير فى كميات الخرسانة المستخدمة وإن كانت تتطلب شدات معقدة وعمالة إضافية لوضع حديد التسليح. وتتكون الدعامات ذات الأعمدة من أعمدة دائرية أو مثمنة يتركز فوقها رأس الدعامة (Bent cap) . وفى بعض التصميمات الحديثة لهذا النمط من الدعامات يتم وضع مفصلات خرسانية (Concrete hinges) بين الرأس والأعمدة لمنع انتقال عزوم الإنحناء من أرضية الكوبرى إلى أعمدة الدعامات. ويفضل ربط أعمدة كل

دعامة فيما بينها بحواجز ربط (Diaphragms) . ويمثل نمط الدعامات المطرقية (Hammer head) أكثر الأنماط رشاقة ويعتبر مناسبا لإنشاء الطرق المرتفعة (Elevated roadways) ولكنه عندما يستخدم فى دعامات الكبارى فوق الأنهار فإنه يؤدى إلى إعاقة للمجرى المائى.

وتتوقف أبعاد القطاع العلوى للدعامة (الطول x العرض أو القطر) على أبعاد كرسى الكوبرى الذى يرتكز عليه الجزء العلوى من الكوبرى (Superstructure) والذى يتم تصميمه بحيث لا تتعدى إجهادات التحميل (Bearing stresses) بين جزء الكوبرى العلوى وكرسى الكوبرى نتيجة الأحمال الحية والميتة الإجهاد المسموح به طبقا لخصائص المادة المستخدمه فى إنشاء هذا الكرسى.

وعادة ما تكون أبعاد القطاع السفلى للدعامة أكبر من أبعاد القطاع العلوى لتناسب الإجهاد المسموح به بين الدعامة والأساسات ويتم زيادة قطاع الدعامة السفلى بعمل ميل فى جميع جوانب الدعامة بدءا من أسفل منسوب كرسى الكوبرى وحتى أعلى منسوب الاساسات.

وفى حالة الكبارى على الأنهار فإنه يجب العناية بالجزء من الدعامة المحصور بين أعلى وأسفل منسوب للمياه حيث أن سطح هذا الجزء يكون أحيانا معرضا للماء وأحيانا أخرى معرضا للهواء وبالتالى فهو معرض للتلف بالإضافة إلى تعرضه للأضرار نتيجة اصطدام الحطام العائم به وتأثير التآكل بفعل تيار الماء والموجات وتأثير الوسط الكيميائى إذا ما إحتوت المياه على أملاح وغيرها. وقد زاد إستخدام الدعامات من الخرسانة المسلحة فى السنوات الأخيرة.

١١-١١-٤-١ الأحمال والقوى التى يجب أخذها فى الاعتبار عند تصميم الدعامات

١- الأحمال الميتة للجزء العلوى من الكوبرى (Superstructure) ووزن الدعامة نفسها.
٢- الأحمال الحية لحركة المرور على الكوبرى مع الأخذ فى الاعتبار تأثير الأحمال غير المحورية.
٣- تأثير الصدم على الدعامة (Impact) .
٤- قابلية الطفو (Buoyancy) للجزء المغمور من الجزء السفلى للكوبرى (Substructure) .
٥- تأثير الرياح على الأجسام المتحركة على الكوبرى وعلى جزء الكوبرى العلوى (Superstructure) .
٦- القوى الناتجة عن تيار الماء.
٧- القوى الناتجة عن تأثير الموجات.
٨- القوى الطولية الناتجة عن حركة مرور العربات.
٩- القوى الطولية الناتجة عن فرامل العربات.
١٠- القوى الطولية الناتجة عن الاحتكاك.
١١- تأثير الزلازل (Seismic effects) .
١٢- قوى الاصطدام المعرضة لها الدعامة فى المجارى الملاحية (Collision) .

ولحساب الأحمال والقوى الواردة فى النقاط ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، ٦ ، ٨ ، ٩ ، ١٠ ، ١١ السابقة فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لحساب الأحمال والقوى فى الأعمال الإنشائية وأعمال المبانى.
وبالنسبة للقوى الناتجة عن تأثير الموجات وقوى الاصطدام (النقاط ٧ ، ١٢ السابقة) فيمكن حسابها كما يلى :

أولا : القوى الناتجة عن تأثير الموجات

تؤدى الموجات إلى توليد قوة ديناميكية أفقية (Horizontal hydrodynamic force) تؤثر على دعامات الكبارى. وهذه القوة يمكن حسابها من المعادلة التالية مرجع (11-42) :

$$F = F_D + F_I \qquad (11\text{-}18a)$$

حيث

F_D = قوة السحب (Drag force)

F_I = قوة القصور الذاتى (Inertial force)

وتحسب كل من هاتين القوتين كمثال لحالة الدعامة الإسطوانية كمايلى:

$$F_D = \int_0^{h+\zeta} \frac{1}{2}\rho\, C_D\, .D\, .u\,|u|\, ds \qquad (11\text{-}18b)$$

$$F_I = \int_0^{h+\zeta} \frac{\pi}{4}\rho\, C_M\, .D^2 . \frac{\delta u}{\delta t}\, ds \qquad (11\text{-}18c)$$

حيث

D = قطر الدعامة الإسطوانيه

ρ = وزن وحدة الحجوم للماء (Mass density)

u = السرعة الأفقية لحبيبات الماء

$\frac{\delta u}{\delta t}$ = العجلة الأفقية لحبيبات الماء

C_D = معامل السحب

C_M = معامل القصور الذاتى

S = المسافة المقاسة رأسيا من القاع وإلى أعلى

h = المسافة من منسوب الماء الساكن (Still water level) وحتى القاع

$$\zeta = a \sin(kx - \sigma t) \qquad (11\text{-}19)$$

a = سعة الموجة (Wave amplitude)

k = رقم الموجة (Wave number) = $\frac{2\pi}{L}$ حيث L = طول الموجة (Wave length)

σ = التردد الزاوى للموجة (Wave angular frequency) = $\frac{2\pi}{T}$ حيث T = زمن الموجة (Wave period)

t = فترة زمنية (Time interval) وهى متغيرة

ويتم حساب المعاملات u ، $\frac{\delta u}{\delta t}$ فى المعادلات السابقة بإستخدام أى من النظريات المتاحة لتحليل الموجات مثل نظرية إيرى (Airy's linear wave theory) أو نظرية ستوك (Stoke's second order wave theory) . أما حساب كل من C_D ، C_M فيتم بإستخدام التجارب (Model tests) وبالملاحظات الحقلية (Field observations) .

وتتراوح قيم C_D بين ٠,٨ - ١,٦ وقيم C_M بين ١,٤٥ - ٢,٣٠ للدعامات الأسطوانية ذات المقطع الدائرى وعند إختلاف شكل الدعامة عن الشكل الأسطوانى فإنه يجب حساب قيم المعاملين C_D ، C_M من تجارب معملية.

ويجب حساب القوى الديناميكية الأفقية المقابلة لقيم مختلفة للزاوية ($\sigma\ t$) تتراوح بين صفر ، ٩٠° للحصول على أكبر قوة لإستخدامها فى التصميم وللمزيد من التفاصيل والمعلومات يمكن الرجوع الى المرجعين (11-36)، (11-5)

ثانيا : قوى الاصطدام

غالبا ما تتعرض دعائم الكبارى الرئيسية فى المجارى الملاحية لاحتمال اصطدام القوارب واللنشات والناقلات بها أثناء العواصف أو أثناء الضباب. ويجب منع هذا الاصطدام ما أمكن لتفادى تلف هذه الدعائم وأيضا تلف اللنش أو القارب. وأفضل وسيلة لذلك هى تزويد الدعامات بحواجز اصطدام (Fenders) مكونه من مجموعة من الخوازيق الخشبية أو الخرسانية توضع حول الدعامة.

وتقدير قيمة قوة الاصطدام التى تستخدم فى تصميم الدعامة وإتجاه هذه القوة يمثل صعوبة تحتاج إلى حس هندسى كبير وعادة ما تتحدد بعد عمل مجموعة من الإختبارات فى معمل هيدروليكى ذى إمكانيات متقدمة. وللمزيد من التفاصيل والمعلومات يمكن الرجوع الى المرجعين (11-36)، (11-5)

١١-١١-٥ الأكتاف Abutments

الكتف (Abutment) هو الجزء السفلى من الكوبرى الذى يرتكز عليه إحدى نهايات الكوبرى ويرتكز عليه فى نفس الوقت الجسر الذى يستخدم كمصعد أو مهبط (Approach) للكوبرى. وفى الكبارى على الأنهار فإن الكتف يحمى الجسر أيضا من النحر الناتج من تيار الماء. وأكتاف الكبارى إما أن تكون من الحجارة أو من الخرسانة العادية أو من الخرسانة المسلحة.

ويتكون الكتف (Abutment) عادة من ثلاثة عناصر إنشائية مختلفة :

١- حائط الصدر (Breast wall) والتى ينتقل إليها مباشرة الأحمال الميتة والحية للجزء العلوى من الكوبرى (Super structure) كما أنها تقوم بسند الردم خلف الجسر.
٢- حوائط الأجنحة (Wing walls) والتى تعمل كإمتداد لحائط الصدر فى سند الردم ولكنها لا تتحمل آية أحمال من الجزء العلوى للكوبرى.
٣- حائط الخلف (Back wall) والتى تعتبر حائط سند صغير وتقع خلف كرسى الكوبرى (Seat bridge) مباشرة وتمنع تسرب أى مواد من الردم إلى كرسى الكوبرى.

١١-١١-٥-١ الأحمال والقوى التى يجب أخذها فى الاعتبار عند تصميم أكتاف الكبارى

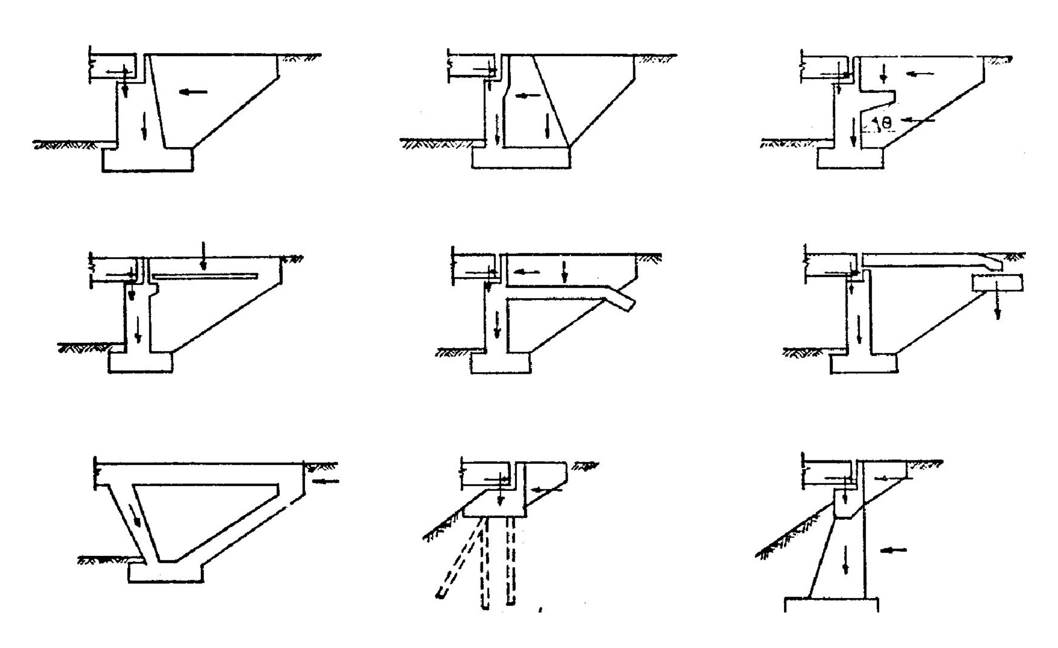
١- الأحمال الميتة من الجزء العلوى من الكوبرى.
٢- الأحمال الحية من الجزء العلوى من الكوبرى.
٣- وزن الكتف.
٤- القوى الطولية نتيجة الجر (Traction) والفرامل وتغير درجات الحرارة.
٥- ضغط الردم على الكتف وتأثير الأحمال الحية على الردم خلف الكتف.

ويتم حساب ضغط الردم على الكتف طبقا لما ينص عليه الجزء السابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات ويراعى وضع نظام صرف جيد للمياه داخل الردم وذلك بوضع ردم من الصخر بعد الكتف مباشرة مع وضع مواسير صرف مناسبة عند القاع.

ويبدأ تصميم الكتف بفرض أبعاد أولية له بناء على نمط الجزء العلوى للكوبرى وطبيعة الأساسات ثم مراجعة الإجهادات عند منسوب العتب (Sill level) . ويجب أن يكون الوجه الأمامى لحائط الصدر

(Breast wall) مـائلا بمـا لا يقل عن ٢٥/١ (يفضـل أن يكـون ١٢/١) ويتوقف ميل الوجه الخلفى لهذا الحائط على العرض المطلوب أسفل الحائط لعدم تجاوز الإجهادات الحدود المسموح بها.
ويجب عمل فواصـل إنشـائية (Construction joints) بين حائـط الصـدر وحـوائـط الأجنحة (Wing wall) فـى حالة كونها من الحجارة أو الخرسانة العادية وخاصة إذا كانت مناسيب التأسيس لحائط الصدر وحوائط الأجنحة مختلفة. وتكون حوائط الأجنحة متعامدة مع حائط الصدر أو مائلة عليه (Splayed) طبقا لظروف الموقع.

ويوضح الشكل (١١-١٧) نماذج للأكتاف من الخرسانة المسلحة. وفى هذه النماذج تكون حوائط الأجنحة كابولية من حائط الصدر دون الحاجة إلى مد قاعدة حائط الصدر أسفل هذه الحوائط كما هو ضرورى بالنسبة للأكتاف من الحجارة.



شكل (١١-١٧) أكتاف نمطية من الخرسانة المسلحة

وانهيار أكتاف الكبارى يكون نتيجة أحد الأسباب التالية :
١- انهيار حائط الصدر نتيجة شروخ الشد.
٢- انهيار حائط الصدر نتيجة التهشم فى الضغط.
٣- الانهيار نتيجة قوى القص.
٤- ميل حائط الصدر نتيجة زيادة عزم الانقلاب (Overturning moment) الناتج عن ضغط التربة.
٥- انزلاق حائط الصدر للأمام نتيجة ضغط التربة فى حالة عدم كفاية الأحمال الرأسية.
٦- انهيار التربة أسفل الحائط لعدم كفاية مقاومة القص لهذه التربة.

١١-١١-٦ الردم خلف الأكتاف

يجب العناية بتصميم وتنفيذ الردم خلف الأكتاف وصرف المياه بوضع مواسير مناسبة. ويجب أن يكون الردم بتربة نظيفة (حجارة ، زلط ، رمل ، ....) مع دمك هذا الردم على طبقات طبقا لقواعد الدمك الواردة بالجزء التاسع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

١١-١١-٧ بلاطة الانتقال Approach Slab

عادة ما تستخدم بلاطة انتقال من الخرسانة المسلحة يرتكز أحد طرفيها على الحائط الخلفى للكتف وتمتد داخل المصعد أو المهبط (Approach) . ويجب أن تغطى هذه البلاطة كامل عرض الطريق على أن تمتد لمسافة لا تقل عن ٣,٥ متر داخل المصعد أو المهبط. وتسليح هذه البلاطة يتكون من شبكتين من الأسياخ إحداهما علوية والأخرى سفلية.

١١-١٢ الأساسات Foundations

١١-١٢-١ عام

يعد تصميم الأساسات جزء هاما من التصميم الكلى للكوبرى حيث يؤثر إلى حد كبير على أمان وإقتصاديات وجماليات الكوبرى. ويتطلب تصميم أساسات الكبارى دراية كاملة بالهيدروليكا وميكانيكا التربة والتحليل الإنشائى.

ويجب على المهندس المصمم لأساسات الكبارى أن يجمع المعلومات اللازمة عن خصائص طبقات التربة بموقع الكوبرى وأيضا عن خصائص المجرى المائى عندما يكون الكوبرى عابرا لمجرى مائى. وتحدد خصائص التربة والخبرة السابقة فى تصميم أساسات الكبارى النمط المناسب من الأساسات الذى يجب إستخدامه. ويجب على المصمم أن يحدد بعناية المتطلبات الآتية اللازمة لتصميم أساسات الكبارى :

١- أقصى عمق متوقع للنحر فى المجرى المائى.
٢- أقل عمق للتثبيت (Grip pressure) .
٣- ضغط التربة عند القاع (Soil pressure) .
٤- الاجهادات المسموح بها فى المادة المستخدمة لإنشاء الأساسات.

١١-١٢-٢ النحر عند الدعامات والأكتاف

تتوقف طبيعة النحر (Scour pattern) عند الكبارى عبر الأنهار على عدة عوامل تشمل مقدار تصرف النهر (Discharge) وميل القاع ومادة القاع وإتجاه التيار ووضع وتخطيط الدعامات بالنسبة للمجرى وأيضا شكل وحجم هذه الدعامات. وبالتالى فإن التنبؤ بعمق النحر ليس بالأمر السهل.

ويمكن تحديد العمق الطبيعى للنحر (Normal scour depth) من معادلة لاسى (أرجع للبند ١١-٣-٩).

١١-١٢-٣ عمق التثبيت أسفل عمق النحر المتوقع Grip Length

فى حالة عدم التأسيس على تربة صخرية فإن عمق تثبيت مناسب (Grip length) يجب أن يتوافر أسفل أقصى عمق للنحر. وأقل عمق تثبيت مطلوب يكون فى حدود ٣/١ أقصى عمق للنحر فى حالة كبارى الطرق ، ٠,٥ أقصى عمق للنحر فى حالة كبارى السكك الحديدية (11-42). والغرض من عمق التثبيت هو تأكيد إستقرار الأساســـات تحت تأثير الظروف القاسية للفيضان ولتأكيد وجود مقاومة سلبية للتربة (Passive pressure) ضد القوى الأفقية.

١١-١٢-٤ أنواع الأساسات

يمكن تصنيف أساسات الكبارى إلى نوعين رئيسيين :

١- أساسات سطحية Shallow foundations .
٢- أساسات عميقة Deep foundations .

كما يمكن تصنيف الأساسات العميقة إلى النوعين التاليين :
أ- أساسات خازوقية.
ب- أساسات قيسونية (Caissons) .
ج- قيسونات صندوقية

وأيضا يمكن تصنيف الأساسات القيسونية إلى :
أ- قيسونات مفتوحة Open Caissons .
ب- قيسونات بنيوماتية Pneumatic Caissons .

والقيسون المفتوح هو الذى ليس له قاع أو غطاء علوى أثناء تغويصه ويشتهر بأسم الأساس الآبارى (Well foundation) . أما القيسون البنيوماتى (Pneumatic caisson) فهو القيسون المزود بسطح دائم أو مؤقت قريب من القاع يمكن العاملين من العمل فى الهواء المضغوط أسفله.

ويستخدم القيسون البنيوماتى للأعماق حتى ٣٠ متر تحت منسوب سطح الماء أما إذا زاد العمق عن ذلك فيمكن اللجوء إلى الأساسات الخازوقية.

وعادة فإن الأساسات الخازوقية تكون مناسبة عندما توجد طبقة رخوة سميكة من التربة تغطى الطبقات الصلدة فى حين أن الأساسات القيسونية تكون مناسبة فى التربة الرملية.

١١-١٢-٥ الأساسات السطحية Shallow Foundations

تنفذ الأساسات السطحية عادة بإستخدام أسلوب الحفر المفتوح مع مراعاة الميول الطبيعية لجوانب الحفر. وهذه الطريقة تعتبر ملائمة لتنفيذ الأساسات فوق منسوب المياه الجوفية وهى طريقة عملية حتى منسوب خمسة أمتار من منسوب الأرض الطبيعية. أما إذا زادت الأعماق عن هذا الحد وأيضا لتنفيذ الأساسات تحت منسوب المياه فإن عملية سند جوانب الحفر (Shoring) بإستخدام الألواح الخازوقية (Sheet piles) أو اللجوء إلى السدود الترابية (Cofferdams) تصبح ضرورية. وهدف السند أو إستخدام السدود الترابية هو عدم زيادة عرض الحفر كثيرا عن عرض الأساسات ولتسهيل عملية تنفيذ الأساسات فى وسط جاف بإستخدام مضخات لسحب المياه من موقع الأساسات. وتختلف السدود الترابية عن الألواح الخازوقية بكونها أضخم حجما وأكثر وزنا وتنفذ قبل بداية الحفر الفعلى. وطبقا لحجم الأساسات وظروف الموقع فإن السدود الترابية يمكن أن تتخذ أحد الأنماط التالية :
أ- سدود ترابية ذات حائط واحد (Single walled) .
ب- سدود ترابية ذات حائطين (Double walled) .
ج- سدود ترابية ذات تجاويف (Cellular) .

وعادة ما تكون حوائط السدود الترابية من الألواح الخازوقية المعدنية بالأشكال المتوفرة فى الأسواق وتستخدم أيضا الألواح الخازوقية من الخرسانة المسلحة أو الخرسانة سابقة الإجهاد. وتعتبر السدود الترابية ذات التجاويف (Cellular) باهظة التكاليف من وجهة النظر الإقتصادية وتستخدم فقط فى حالة إنشاء الدعائم الخاصة بالكبارى ذات البحور الطويلة عبر الأنهار العريضة فى المناطق المعرضة لتيارات المد والجزر.
وتصمم السدود الترابية بحيث تكون غير منفذة للمياه مع مراعاة إستقرارها واتزانها عند تعرضها للفيضان والأمواج والأحمال الأخرى المتوقعة مع الأخذ فى الاعتبار أيضا فكها وإعادة إستخدام موادها مرة أخرى. وعادة ما يكون العمق الأقصى للألواح الخازوقية المستخدمة فى حوائط السدود الترابية فى حدود ٢٢ متر.

وتصمم تجاويف (Cells) السدود الترابية ذات التجاويف بحيث تكون مستقرة ضد الانقلاب (Overturning) والانزلاق (Sliding) والشد المحيطى أثناء الدق (Circumferntial tension) ويراعى عند إنشاء الأساسات السطحية فوق طبقة صخرية تسوية طبقة الصخر وإضافة أشاير معدنية (Dowels) تربط بين الأساسات والطبقة الصخرية مع حساب قطر وتباعد هذه الأشاير من واقع الأحمال والقوى المؤثرة على الأساسات. وكقيم استرشادية يمكن إستخدام أشاير بقطر ٣٨ مم مع تباعد ٠,٨ متر. ويراعى وضع طبقة تسوية من الخرسانة الفقيرة (Lean) بين الطبقة الصخرية والأساس. هذا ويجب مراعاة جميع الضوابط والشروط الخاصة بالأساسات السطحية والواردة فى الجزء الثالث بالكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

١١-١٢-٦ الأساسات الخازوقية

يمكن تصنيف الأساسات الخازوقية إلى النوعين الرئيسيين التاليين :

أ- أساسات خازوقية احتكاكية (Friction piles) .

ب- أساسات خازوقية ارتكازية (Point bearing piles) .

ويعتمد النوع الأول فى نقل الأحمال إلى التربة على الاحتكاك (Friction) بين الخازوق والتربة على كامل الطول المدفون من الخازوق فى التربة. ويستخدم هذا النوع فى التربة التى لا تزيد مقاومتها كثيرا مع زيادة العمق.

وينقل النوع الثانى الأحمال الواقعة عليه إلى الطبقة الصلدة من التربة والتى يرتكز عليها. ويجب التأكد من مقدرة هذه الطبقة على تحمل هذه الأحمال.

وحيث أن طبيعة طبقات التربة تختلف اختلافا كبيرا حتى فى الموقع الواحد فإن الدراسات العميقة والجادة يجب إجراؤها لتصميم أساسات خازوقية مناسبة.

ويمكن تقدير قوة تحمل الخازوق المفرد بدقة كبيرة بإجراء تجارب تحميل (Load test) فى الموقع. كما يمكن تقدير هذه القوة بإستخدام أحد الصيغ الوضعية المتاحة (Empirical formula) . وبالنسبة لخوازيق الارتكاز فإن قوة تحمل الخازوق المفرد والمقدرة بإختبار التحميل يمكن إستخدامها بكامل قيمتها عند تصميم مجموعة خوازيق أسفل مخدة خوازيق (Pile cap) فى حين أنه فى حالة خوازيق الاحتكاك فإن هذه القوة تقل عند تصميم مجموعة خوازيق أسفل مخدة خوازيق أى أن كفاءة خازوق الإحتكاك المفرد تقل عند تشغيله ضمن مجموعة خوازيق وتتوقف نسبة النقص فى كفاءة الخازوق على التباعد بين الخوازيق فى المجموعة حيث تقل هذه النسبة بزيادة التباعد. ويتم الرجوع الى البند (٤-٣-٦) من الباب الرابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم الأساسات والخاص بقدرة تحمل الخوازيق.

وعادة ما تستخدم الخوازيق الرأسية فى أساسات الكبارى. فى حين أن الخوازيق المائلة (Batter piles) أكثر كفاءة فى مقاومة القوى الأفقية المؤثرة على الدعائم والأكتاف علما بأن دق هذه الخوازيق بالميل المطلوب بدقة يعد أمرا صعب التنفيذ ويحتاج إلى خبرات ومعدات خاصة.

والخوازيق المستخدمة فى أساسات الكبارى تكون إما من الحديد أو من الخرسانة المسلحة أو الخرسانة سابقة الإجهاد. والنوع الشائع الإستخدام هو الخوازيق من الخرسانة المسلحة والتى يمكن أن تكون إما خوازيق سابقة الصب (Precast concrete piles) أو خوازيق مصبوبة بالموقع. ولكل منهما مزاياه وعيوبه. وحيث أن أساسات الكبارى عادة ما تكون أسفل الماء أو فى تربة ذات منسوب مياه جوفية عال فإن الخوازيق سابقة الصب من الخرسانة المسلحة تكون مفضلة. وفى نفس الوقت فإن الخوازيق الخرسانية المصبوبة بالموقع تتميز بعدم تعرضها للتلف عند صبها بخلاف الخوازيق سابقة الصب التى

يمكن تعرضـها للتلف عند دقها. ولكن العيب الخطير للخوازيق المصبوبة بالموقع يكمن فى عدم كفاية معالجتها (Curing) بعد الصب إذا مـا تعرضت لمهاجمـة المركبات الكيميائية المتواجدة بالماء الجوفى وعدم ملاحظة ذلك أثناء الإنشاء.

ويمكن إستخدام الخوازيق سابقة الصب مع الخوازيق المصبوبة فى الموقع فيما يعرف بالأسلوب المختلط (Hybrid procedure) فـى الأساســات الخازوقية. وفـى هذه الحالـــة يتم دق غـلاف مـن الحديـــد (Steel shell) إلـى العمق المطلوب ثم يتم تفريغ التربة من داخل هذا الغلاف. وبعد ذلك يتم إنزال خازوق سابق الصب ذى فراغ داخلى مركزى (Central duct) بكامل طوله داخل الغلاف ثم تضخ عجينة مونة أسمنتية (Coment morter grout) داخل هذا الفراغ الداخلى المركزى مع سحب الغلاف الحديدى فى نفس الوقت. وتملأ هذه العجينة الأسمنتية الفراغ بين جسم الخازوق والتربة المحيطة به مما يوفر الاحتكاك الجيد بينهما. ويعتبر هذا الأسلوب مفضلا فى حالة المياه الجوفية المحتوية على مركبات ضارة بالخرسانة.

١١-١٢-٦-١ الأساسات الخازوقية الخرسانية سابقة الصب
Precast Concrete Piles

قطاع الخازوق الخرسانى سابق الصب يمكن أن يكون على شكل دائرة أو مربع أوسداسى أو مثمن. ويتم الرجوع الى البندين (٤-٣-٣-١-٣ب)،(٤-٣-٨-٤-٤) من الباب الرابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة فى تصميم وتنفيذ الأساسات لمواصفات واشتراطات وطرق تنفيذ هذا النوع من الخوازيق.

١١-١٢-٦-٢ الأساسات الخازوقية الخرسانية المصبوبة بالموقع
Cast in Place Concrete Piles

تنفذ الخوازيق الخرسانية المصبوبة بالموقع بملأ الثقوب الأسطوانية التى يتم حفرها فى التربة بالخرسانة بطرق مختلفة. وهناك نوعان من هذه الخوازيق طبقا لطريقة التنفيذ :

أ- الخازوق ذو الغلاف (The shell pile) وفى هذا النوع يتم أولا دق غلاف أسطوانى من الحديد بإستخدام المطرقة ثم يملأ بالخرسانة ويترك الغلاف الحديد بعد الصب فى مكانه.

ب- الخازوق بدون غلاف (The shell less pile) وفى هذا النوع يتم سحب الغلاف الحديدى بعد صب الخرسانة.

ويتم الرجوع الى البنود (٤-٣-٣-٢)، (٤-٣-٣-٣)، (٤-٣-٨) من الباب الرابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات لمواصفات واشتراطات وطرق تنفيذ هذا النوع من الخوازيق للوقوف علـى التفاصيل الخاصـة بالتباعد بين الخوازيق وكيفية توزيع الأحمال الواقعة علـى مخدة الخوازيق (Pile cap) على الخوازيق المختلفة وأيضا كيفية تصميم مخدة الخوازيق وجميع الاشتراطات والضوابط بتصميم وتنفيذ الأساسات الخازوقية.

١١-١٢-٦-٣ وصل الخوازيق Pile Splicing

عندما يستدعى الأمر زيادة طول الخوازيق الخرسانية سابقة الصب فى الموقع لتصل الخوازيق إلى الطبقة السليمة من التربة فإن الطريقة المعتادة لوصل الخازوق تكون بتكسير جزء من أعلى الخازوق لكشف حديد التسليح الطولى بالطول الكافى لوصل حديد الجزء المضاف (Lap length) ثم عمل شدات للجزء المضاف وإضافة شبكة حديد تسليح له ثم صب خرسانة هذا الجزء ثم دق الجزء بعد تمام تصلبه. وتوجد عدة طرق أخرى لوصل الخوازيق سابقة الصب.

١١-١٢-٧ الأساسات القيسونية المفتوحة (الآبارية) Well Foundations

الأساس الأبارى للكبارى يمكن أن يتكون من بئر واحد ذى قطر كبير أو من مجموعة آبار صغيرة ذات قطاعات دائرية أو غيرها من الأشكال مثل المربع والمستطيل. ومن وجهة نظر المجهود المبذول فى تغويص البئر وإنشاء الشدات فإن بئرا واحدا ذا قطر كبير يكون أكثر إقتصادا من مجموعة من الآبار ذات أقطار صغيرة.

ولتحديد منسوب التأسيس للأساسات الآبارية فإنه يجب أخذ العوامل الآتية فى الاعتبار :

أ- الطبقة الرملية ذات كفاءة الارتكاز المناسبة تكون مفضلة عن الطبقات الطينية.

ب- أى طبقة طينية رقيقة بين طبقتين رمليتين لا يعتمد عليها فى التأسيس ويجب إختراقها للوصول إلى الطبقات السليمة.

ج- إذا أقتضت الضرورة ارتكاز البئر على طبقة فيجب أن تكون هذه الطبقة جاسئة (Stiff) .

ويتكون الأساس الآبارى من العناصر التالية:

أ- كعب البئر (Well curb) .

ب- جسم البئر (Steining) .

ج- السدادة السفلية (Bottom plug) .

د- الرمل المالئ (Sand filling) .

هـ- السدادة العلوية (Top plug) .

و- مخدة البئر (Well cap) .

ويحمل كعب البئر (Well curb) والذى يكون من الخرسانة المسلحة الحافة القاطعة للبئر (Cutting edge). ويكون جسم البئر (Steining) إما من الطوب الحجرى (Brick masonry) أو من الخرسانة المسلحة.

ويجب مراعاة العوامل التالية عند تقدير سمك جسم البئر :

١- القدرة على تغويص جسم البئر.

٢- عدم إتلاف البئر أثناء عملية التغويص.

٣- إذا حدث ميل أو انحراف للبئر أثناء عملية التغويص فيمكن تقويم هذا الميل أو الانحراف دون الإضرار بالبئر.

٤- قدرة البئر على مقاومة الضغط الناتج عن فوران الرمل (Sand blow) الممكن حدوثه أثناء عملية التغويص بأمان.

٥- الإجهادات المتولدة عند أى قطاع من قطاعات جسم البئر نتيجة الأحمال الناتجة عن عملية تغويص البئر أو بعد تشغيله يجب أن تكون فى حدود الإجهادات المسموح بها طبقا لمادة جسم البئر.

ووظيفة السدادة السفلية للبئر (Bottom plug) هى نقل الأحمال من جسم البئر إلى التربة أسفل البئر. واسترشاديا فإن سمك هذه السدادة الخرسانية يكون مساويا لعمق كعب البئر (Well curb) + ٠,٣ متر للآبار ذات الأقطار الصغيرة ويكون مساويا لعمق كعب البئر + ٠,٦ متر للآبار ذات الأقطار الكبيرة. ويجب أن تكون الخلطة الخرسانية المستخدمة فى هذه السدادة غنية بالأسمنت لاحتمال فقد جزء منه أثناء صب السدادة أسفل منسوب سطح الماء.

ويكون سمك السدادة العلوية (Top plug) حوالى ٠,٣ متر وتوضع أسفل مخدة البئر (Pile cap) وأعلى الرمل المالئ المضغوط (Compacted sand filling) .

ويتم ملء الفراغ داخل جسم البئر بين أسفل السدادة العلوية وأعلى السدادة السفلية بالرمل النظيف وذلك لزيادة مقاومة البئر للانقلاب (Overturing) . وفى حين أن هذا الإجراء يعتبر مناسبا بالنسبة للآبار المرتكزة على طبقات صخرية أو رملية فإنه غير مرغوب فيه عندما يرتكز البئر على طبقات طينية حيث يؤدى هذا الملء إلى زيادة الأحمال على الأساس مما يؤدى إلى زيادة الهبوط أسفله (Settlement) . وفى هذه الحالة فإنه يمكن ملء جزء فقط من فراغ البئر وأن يترك الجزء الباقى حرا. ووظيفة مخدة البئر (Well cap) هى نقل الأحمال من الدعامة (Pier) إلى البئر أو الآبار أسفلها. ويكون عرض مخدة البئر مساويا لقطر البئر أو مرفرفا عنه (Cantilevering) بحوالى ١٥٠ مم. وإذا ما استعمل أكثر من بئر واحد تحت الدعامة فإن مسطح المخدة يجب أن يمتد ليغطى كل الآبار أسفلها.

وتمثل عملية تغويص البئر أهمية كبيرة وتحتاج إلى مهارة خاصة. ويجب محاولة تقليل الميل (Tilting) الذى يحدث للبئر أثناء تغويصه ومعالجة هذا الميل إذا ما حدث. ويحدث هذا الميل نتيجة عدم انتظام الحفر قبل تغويص البئر أو نتيجة عدم تجانس التربة حول البئر أو نتيجة التغير المفاجئ فى الاحتكاك المتولد عن التربة حول جسم البئر.

ويمكن تقويم هذا الميل (Tilting) بإستخدام أحد الطرق التالية أو غيرها :

أ- إستخدام ماء متدفق (Water jet) على المحيط الخارجى للجانب العالى من البئر لتقليل قوة الاحتكاك.

ب- تجريف التربة من ناحية الجانب العالى (Dredging) .

١١-١٢-٨ القيسونات البنيوماتية Pneumatic Cassions

الميزة الرئيسية لإستخدام القيسونات البنيوماتية هى إمكانية تفقد تربة الأساس عند قاع أسطوانة الحفر بحيث يمكن إزالة آية عوائق مثل الصخور وغيرها. كما أن عملية صب الخرسانة لهذا النوع من الأساسات تتم فى الهواء بدلا من إتمامها تحت سطح الماء كما فى الأساسات الآبارية. ولكن العيب الرئيسى لهذا النوع من الأساسات هو أن جميع الأعمال تحت قاع أسطوانة الحفر يجب أن تتم تحت تأثير الهواء المضغوط (Compressed air) والذى يجب أن يكون ضغطه كافيا لمعادلة الضغط الهيدروستاتيكى لعمود الماء من منسوب الحافة القاطعة وحتى سطح الماء.

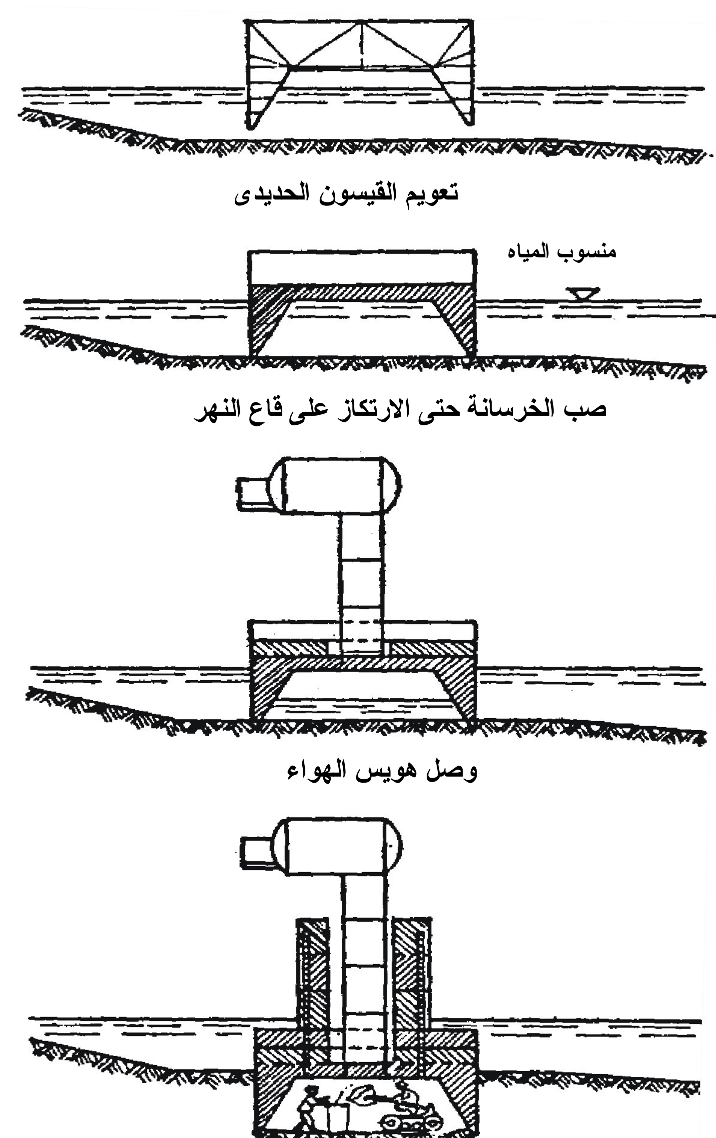
ويوضح الشكل (١١-١٨) الخطوات المتبعة فى تنفيذ القيسونات البنيوماتية (Pneumatic caissons) ويتكون الأساس البنيوماتى من حجرة عمل (Working chamber) يتم تعويمها إلى مكان الدعامة ثم يتم صب الخرسانة المكونه لجسم الحجرة كما يتضح من الشكل (١١-٨). وبعد ذلك يتم وصل أهوسة الهواء (Air locks) الخاصة بالرجال والمخلفات (Muck) وتغويصها. ويعقب ذلك صب خرسانة الدعامة. ويجب أن يكون سقف حجرة العمل قويا بما يمكنه من تحمل وزن الدعامة كما يجب أن يكون غير منفذ للهواء (Air tight). ويصنع هويس الهواء من الصلب ويجب أن يكون له بابان أحدهما يغلق بإحكام بينما يكون الأخر مفتوحا للإستخدام. كما يجب إتخاذ الاحتياطيات اللازمة لجعل زيادة أو نقص الضغط داخل الهويس تتم تدريجيا.

وكما هو معروف فإن الضغط الذى يمكن أن يتحمله الإنسان يصل إلى ٣,٥ ضغط جوى فوق الضغط العادى وهذا الضغط يتحقق عند عمق ٤٠ متر ، ولذلك فإنه من غير المناسب تجاوز هذا العمق فى حالة القيسونات البنيوماتية. وبعد تمام تغويص القيسون البنيوماتى يتم ملء حجرة العمل بالخرسانة. ويتم نقل هذه الخرسانة من خلال هويس الهواء ويتم الاحتفاظ بضغط الهواء حتى تكتسب الخرسانة مقاومتها التصميمية.

وللمزيد من التفاصيل والمعلومات وتصميم القيسونات البنيوماتيه يمكن الرجوع الى البندين (٤-٤-٣)، (٤-٤-٥) من الباب الرابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات.

١١-١٢-٩ القيسونات الصندوقية

يتم الرجوع الى البندين (٤-٤-٤)، (٤-٤-٥) من الباب الرابع من الكود المصرى لميكانيكا التربة وتصميم وتنفيذ الأساسات لكيفية تنفيذ القيسونات الصندوقية وأسس تصميمها.



شكل (١١-١٨) قيسون بنيوماتى لدعامة فى كوبرى

١١-١٣ قواعد التحميل - الوصلات - الدرابزينات
Bearings, Joints and Handrails

١١-١٣-١ قواعد التحميل Bearings

تستخدم قواعد التحميل فى الكبارى لنقل الأحمال من الجزء العلوى من الكوبرى (Superstructure) إلى الجزء السفلى منه (Substructure) بحيث تكون الإجهادات المتولدة فى الجزء السفلى فى حدود المسموح به وأيضا لتسمح بتحركات محددة للجزء العلوى وهذه التحركات تكون عادة نتيجة ما يلى :

أ- تحرك طولى نتيجة تغير درجات الحرارة.
ب- دوران (Rotation) نتيجة ترخيم (Deflection) الكمرات الرئيسية.
ج- تحرك رأسى نتيجة هبوط الدعائم (Setllement).

وبالإضافة إلى ذلك فإنه يمكن وجود تحركات أخرى نتيجة الانكماش والزحف وسبق الإجهاد. ويمكن تقسيم قواعد التحميل إلى نوعين رئيسيين :

أ- قاعدة تحميل ثابتة (Fixed) .
ب- قاعدة تحميل قابلة للتمدد (Expansion).

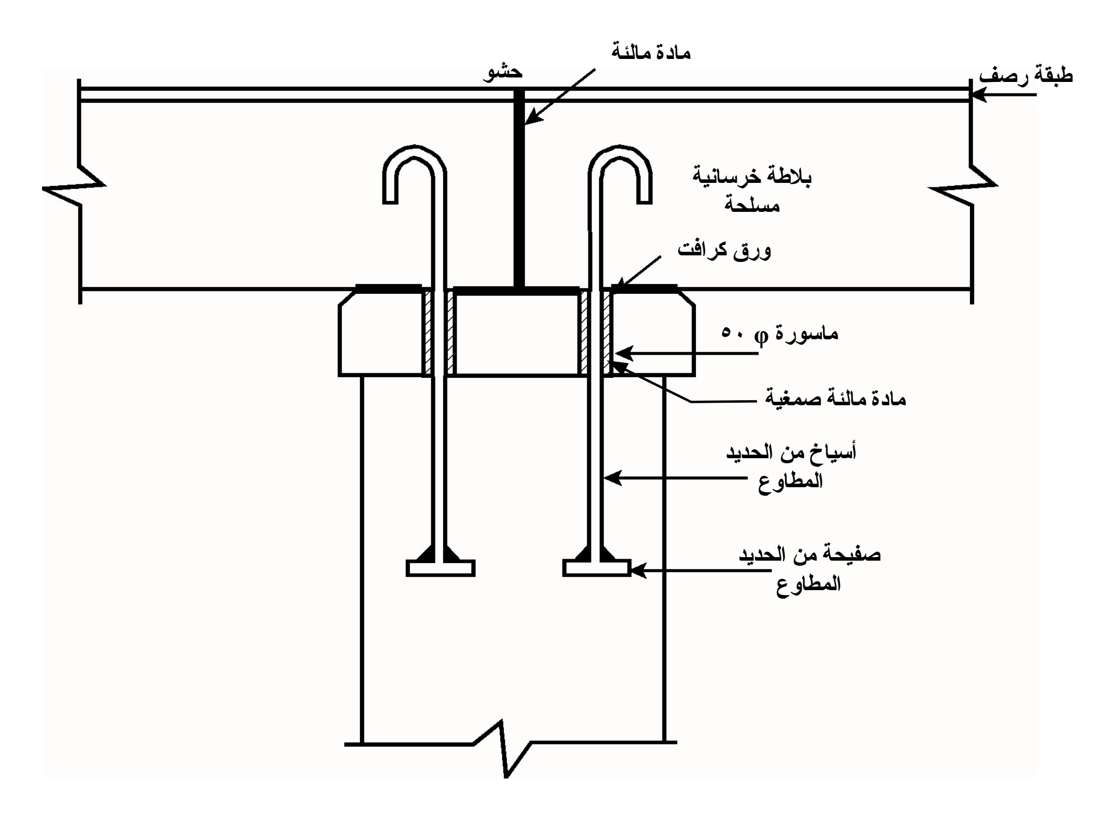
وتتصف الأولى بمقدرتها على إباحة الدوران فقط بينما تتصف الثانية بمقدرتها على إباحة كل من الحركة الطولية والدوران. وتتطلب البحور البسيطة الارتكاز (Simply supported spans) قاعدة ثابتة عند أحد طرفيها وأخرى قابلة للتمدد عند الطرف الأخر بينما تتطلب الكمرات متعددة البحور (Continuous girders) قواعد قابلة للتمدد عند جميع نقط ارتكازها عدا واحدة.

وتمثل قواعد التحميل جزءا هاما من الكوبرى وتتطلب عناية خاصة فى التصميم ومهارة فى التنفيذ واهتماما منتظما بصيانتها. وغالبا ما يؤدى التصميم الخاطئ لقواعد التحميل إلى انهيار الكوبرى. وتصل تكلفة قواعد التحميل فى الكبارى الرئيسية إلى نسبة ١٠ - ١٥ % من التكلفة الكلية للكوبرى. ولهذا يجب الاهتمام الكامل بتصميمها.

١١-١٣-١-١ قواعد التحميل للكبارى ذات البلاطات Slab Bridges

لا تحتاج الكبارى مرتفعة المنسوب ذات البلاطات إلى قواعد تحميل خاصة. ويمكن وضع طبقة سميكة من القطران (Tarfelt) أو ورق الكرافت (Kraft paper) بين بلاطة الكوبرى والجزء السفلى عند الركائز لتعمل كقاعدة تحميل. وهذه القاعدة تسمح بتحرك طولى صغير. وللسماح بالدوران فإنه يمكن شطف أو تدوير قاعدة التحميل عند حوافها.

وبالنسبة للكبارى الغاطسة ذات البلاطات فإنه يجب معالجة قوى دفع الماء (Uplift) . ويمثل الشكل (١١-١٩) أحد الحلول التى يمكن إتباعها كقاعدة تحميل فى هذا النوع من الكبارى مرجع (43-11).



شكل (١١-١٩) قاعدة تحميل لكوبرى غاطس

١١-١٣-١-٢ قواعد التحميل للكبارى ذات الكمرات Girder Bridges

يتم تزويد الكبارى ذات الكمرات بقواعد تحميل ثابتة وقواعد تحميل قابلة للتمدد. ويجب تصحيح وضع قواعد التحميل القابلة للتمدد أثناء الإنشاء لمعالجة انحرافها نتيجة درجات الحرارة السائدة فى زمن الإنشاء. وبالنسبة للمناطق المعرضة للزلازل (Seismic areas) فإنه يجب وضع الضوابط الكفيلة بمنع تحرك الأجزاء المكونة للبكرات (Rollers and rockers) أثناء الزلازل. وبالنسبة للكبارى المنحرفة (Skew bridges) بزاوية ميل تقل عن ٢٠ درجة فإن قواعد التحميل المعدنية يجب أن توضع بحيث تكون متعامدة مع المحور الطولى للكوبرى. وعندما تزيد زاوية الميل عن ٢٠ درجة ويقل بحر الكوبرى فى إتجاه المحور الطولى عن ١٠ أمتار فإن قاعدة تحميل قابلة للتمدد (Sliding) يجب وضعها عند الطرفين. أما إذا زاد البحر عن ١٠ أمتار فإن قاعدة تحميل ثابتة يجب وضعها عند الركن المتفرج من الكوبرى. وحيث أن محور الدوران وإتجاه التحرك الطولى غير متعامدين فى الكبارى المنحرفة فإن قواعد التحميل الثابتة المستخدمة يجب أن تسمح بالدوران فى جميع الإتجاهات كما أن قواعد التحميل القابلة للتمدد المستخدمة يجب أن تسمح بالتحرك والدوران فى جميع الإتجاهات.

وفى حالة الكبارى المنحنية (Curved bridges) فإنه يجب إستخدام قواعد التحميل التى تسمح بالحركة والدوران فى جميع الإتجاهات.

وقواعد التحميل القابلة للتمدد المستخدمة فى الكبارى ذات الكمرات تكون من أحد الأنماط التالية :

أ- قاعدة مسطحه (Plate bearing) .

ب- قاعدة ذات بكرات معدنية (Steel roller bearing) .

ج- قاعدة ذات بكرات خرسانية مسلحة (R.C rocker bearing) .
د- قاعدة مرنة (Elastomeric bearing) .

كما يمكن تصنيف قواعد التحميل الثابتة إلى الأنماط التالية :
أ- قاعدة مسطحة (Plate bearing) .
ب- مفصلة معدنية (Steel hinge) .
ج- قاعدة ذات بكرات معدنية (Steel rocker bearing) .
د- قاعدة ذات بكرات خرسانية مسلحة (R.C. rocker bearing) .
هـ- مخدة من مونة الأسمنت (Cement mortar pad) .

١١-١٣-١-٣ قواعد التحميل القابلة للتمدد Expansion Bearings

أولا : القاعدة المسطحة Plate Bearing

يعد هذا النمط من أبسط أنماط قواعد التحميل القابلة للتمدد وهو مناسب للبحور حتى ٢٠ متر.

وفى حالة الكبارى المنحنية (Curved bridges) فإن قواعد التحميل يجب أن تسمح بالحركة والدوران فى جميع الإتجاهات.

ثانيا : القاعدة ذات البكرات المعدنية

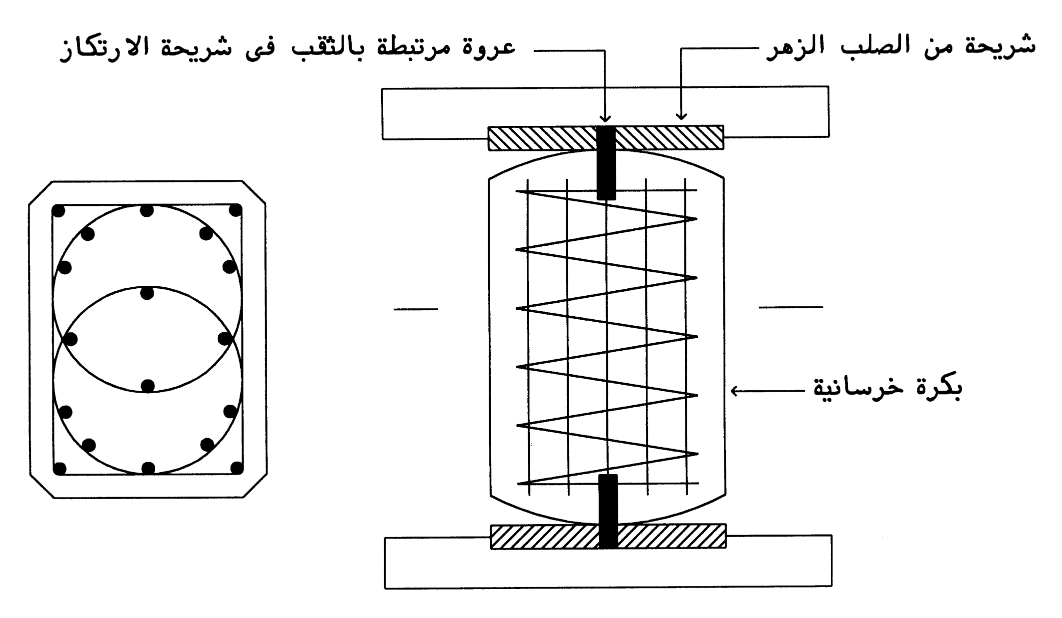
Steel Roller cum Rocker Bearing

تستخدم القواعد ذات البكرات المعدنية عادة فى الكبارى الرئيسية ذات البحور أكبر من ٢٠ متر. ويمكن أن تضم القاعدة بكرة واحدة أو بكرتين أو مجموعة بكرات ذات حجم صغير وبقطر من ١٠ - ١٥ سم. ويفضل إستخدام بكرة واحدة ذات قطر كبير أو بكرتين على إستخدام مجموعة بكرات ذات حجم صغير وذلك لتفادى جمود البكرات الصغيرة فى مكانها وعدم تأديتها لوظيفتها بفعل القاذورات والأتربة التى تتراكم عليها وأيضا تعرضها للتلف نتيجة الحركة غير المحسوبة الناتجة عن تغير درجات الحرارة.

ثالثا : القاعدة ذات البكرات من الخرسانة المسلحة

R.C. Rocker Bearing

نظرا لإرتفاع ثمن القواعد ذات البكرات المعدنية فإن قواعد ذات بكرات من الخرسانة المسلحة يمكن إستخدامها فى الكبارى الخرسانية بنفس كفاءة القواعد ذات البكرات المعدنية إذا ما أحكم تصميمها. وتكاليف صيانة هذه القواعد ذات البكرات الخرسانية لا يذكر مقارنة بتكاليف صيانة القواعد ذات البكرات المعدنية المماثلة. ويوضح الشكل (١١-٢٠) نموذجا لقاعدة ذات بكرات من الخرسانة المسلحة.



شكل (١١-٢٠) قاعدة ذات بكرات خرسانية مسلحة

رابعا : القاعدة المرنة Elastomeric Bearing

تتميز القواعد المرنة بسهولة تنفيذها ورخص تكاليف إنشائها وعدم حاجتها للصيانة. وإرتفاع هذه القواعد صغير جدا مقارنه بالقواعد ذات البكرات مما يساهم فى تقليل تكلفة إنشاء المصاعد والمهابط للكوبرى (Approaches) . ويمكن رفع واستبدال هذه القواعد بيسر وسهولة.

وتتكون هذه القواعد أساسا من وسادة من المطاط الطبيعى أو من مادة صناعية (Synthetic material) ذات خصائص مماثلة للمطاط. ومن بين بدائل كثيرة مطروحة فإن النيوبرين (Neoprene) هو الأشمل إستخداما حيث أنه مقاوم للظروف الجوية وأيضا مقاوم للإشتعال (Flame resistant) . ويجب أن تتوافر فى هذا النيوبرين صلابة وممطولية مناسبة . كما يجب إجراء بعض الإختبارات الأخرى على هذا النيوبرين لمعرفة مدى إلتصاقه بالمعادن وقابليته للانضغاط ومقاومتة للاوزون (Ozone) وغيرها.

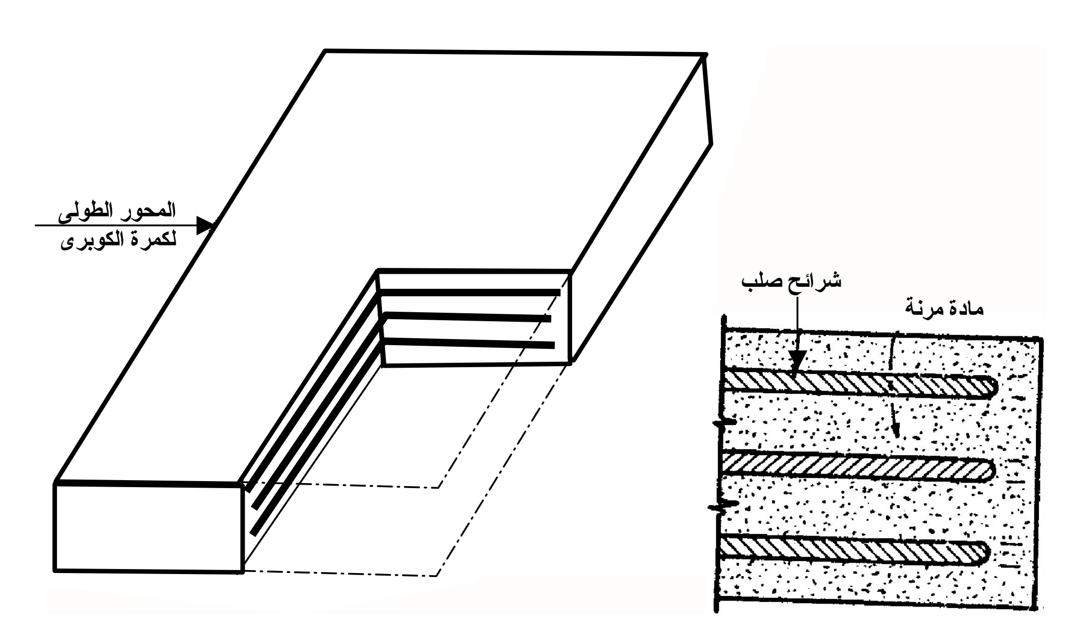
ويمكن إستخدام المواصفات القياسية (ASTM) فى هذا الشأن.

وتتكون الوسادة غير المسلحة من طبقة واحدة مستطيلة الشكل من النيوبرين وتستخدم لنقل الأحمال الموزعة فى الكبارى ذات البلاطات حيث البحور تقل عن ١٠ متر.

وتستخدم الوسادة المسلحة لنقل الأحمال المركزة فى الكبارى ذات الكمرات وتتكون من عدة طبقات مستطيلة الشكل من النيوبرين تفصلها عن بعضها رقائق معدنية مستطيلة الشكل أيضا. وتربط هذه الرقائق مع النيوبرين أثناء التصنيع. والوسادة المسلحة إما أن تكون على شكل طبقات (Laminated) أو على شكل قالب (Moulded) . والنوع الأول يصنع من عدد من الوحدات المسلحة والتى يتم الربط بينها بواسطة لاصق مناسب. وكل وحدة تتكون من طبقة من النيوبرين ملتصقة مع رقيقتين من المعدن على وجهيها. وبالتالى فإن الفواصل الداخلية تتكون من رقائق من المعدن ملتصقة ببعضها بينما يتم تغطية الوجة السفلى والعلوى للوسادة برقائق معدنية.

ويـتم تصـنيع الوسـادة علـى شـكل قالـب (Moulded) فـى عملـية واحـدة حيث يـتم صـب جمـيع طـبقات النيوبرين والرقائق بينها فى قالب واحد وفى نفس الوقت وبالأبعاد المطلوبة.

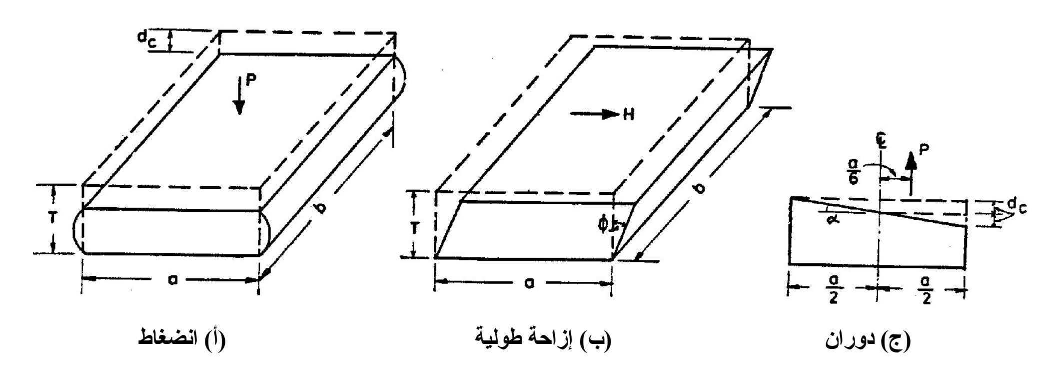
ويوضـح الشكل (١١-٢١) نموذجا لقاعدة مرنـة مسلحة على شكل قالب والتى يفضل إستخدامها الآن فى الكبارى. وتتناسب القواعد المرنه تحركات من ٥ الى ١٢٥ مم مصحوبة بدوران أو بدون دوران.



شكل (١١-٢١) ركيزة مرنـة نمطية

ب- تصميم القواعد المرنـة

يعتمد أسلوب تصميم القاعدة المرنة على أساس أن الحركة الجانبية تتم عن طريق القص (Shearing) بينمـا يـتحقـق الـدوران (Rotation) عـن طـريـق الانضـغـاط الخطـى المتغير غيـر المتسـاوى (Non uniform linearly varying compressive deformation). ويوضـح الشكل (١١-٢٢) التشكلات الأساسية المؤثرة على القاعدة المرنـة.



شكل (١١-٢٢) التشكلات الرئيسية للقواعد المرنـة تحت تأثير الأحمال

وتعتمد الجساءة الرأسية للقاعدة على حريتها فى التقبب (Bulge) عند حوافها وهو ما يعبر عنه بمعامل الشكل (S) (Shape factor) . ومعامل الشكل (S) يكون مساويا للنسبة بين المساحة المعرضة للحمل إلى المساحة الجانبية للقاعدة المرنة.

$$S = \frac{a\,b}{2\,T\,(a+b)} \qquad (11\text{-}20)$$

حيث T , b , a معرفة جميعها فى الشكل (١١-٢٢)

ولتصميم القاعدة المرنة غير المسلحة (Unreinforced bearing) يمكن الرجوع الى المرجع (11-42)

١١-١٣-١-٤ القواعد الثابتة Fixed Bearings

أولا : القاعدة الثابتة المسطحة Fixed Plate Bearing

القاعدة الثابتة المسطحة قريبة الشبه إلى حد كبير بالقاعدة المسطحة القابلة للتمدد (Expansion plate bearing) عدا أنها لا تسمح بالحركة الطولية.

ثانيا : القاعدة الثابتة ذات المفصلة المعدنية Cast Steel Hinge

هذا النوع من قواعد التحميل نادر الإستخدام الآن فى الكبارى الحديثة.

ثالثا : القاعدة الثابتة ذات البكرات المعدنية Mild Steel Rocker Bearing

يستخدم هذا النوع من قواعد التحميل فى الكبارى ذات البحور الطويلة وذلك نظرا لإرتفاع تكاليفه. وتتكون هذه القاعدة من جزء علوى ذى سطح تلامس مقوس يهتز (Rocking) على سطح تلامس أفقى للجزء السفلى.

رابعا : القاعدة الثابتة ذات البكرات الخرسانية المسلحة R.C. Rocker Fixed Bearing

تستخدم القواعد الثابتة ذات البكرات الخرسانية المسلحة فى الكبارى الخرسانية نظرا لإرتفاع تكلفة القواعد الثابتة ذات البكرات المعدنية. وتتكون القاعدة الثابتة ذات البكرات من الخرسانة المسلحة من كرسى خرسانى (R.C. pedstal) ورقيقة من الرصاص توضع بين أعلى الكرسى وبطنية الكوبرى. ويكون عرض رقيقة الرصاص مساويا لعرض الكمرة فى حين يكون طولها بحيث يكون الإجهاد الواقع عليها فى الحدود المسموح بها. ويوضع عدد من أشاير الحديد بقطر مناسب لمقاومه القص الناتج من القوى الطولية. وتسمح رقيقة الرصاص بالدوران فى حين تمنع الأشاير الحديدية الرأسية الحركة الطولية. ويتم شطف حواف أعلى الكرسى ليسمح بدوران كمرة الكوبرى.

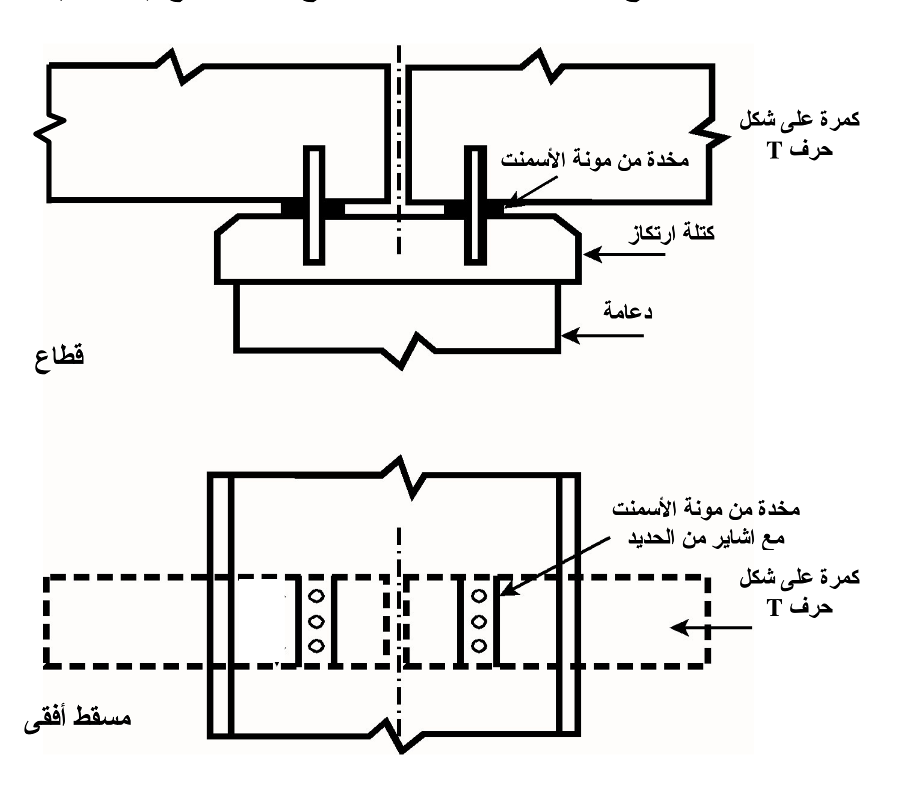
خامسا : القاعدة الثابتة على شكل مخدة من مونة الأسمنت Cement Mortar Pad

يعتبر هذا النوع من قواعد التحميل أرخص أنواع القواعد الثابتة تكلفة. وتتكون هذه القاعدة من مخدة من مونة الأسمنت والرمل بسمك مناسب. ويستخدم عدد مناسب من أشاير الحديد الرأسية بقطر حوالى ٢٥ مم لربط الجزء العلوى من الكوبرى (Superstructure) بالمخدة. وعادة ما يكون عرض المخدة مساويا لعرض كمرة الكوبرى بينما يحسب طول المخدة بحيث يكون الإجهاد الواقع عليها فى حدود

المســـموح به. وتســـتخدم أشـــاير الحديد فى مقاومـة القص الناتج عن القوى الطوليـة. ويوضـح الشـــكل (١١-٢٣) نموذج للقاعدة الثابتة على شكل مخدة مونة الأسمنت.

وقد حد استخدام القواعد المنزلقة الحديثه من مادة البولى تترافلوروايثيلين Polytetrafluoroethylen (Ptfe) من استخدام القواعد الميكانيكية التقليدية. ومادة(Ptfe) هى فلوروكربون بوليمرتتميز بانخفاض معاملات الإحتكاك الأستاتيكية والديناميكية عن أى مادة جاسئة. ويمكن تحسين مقاومة ضغطها المختصة بأستخدام إضافات fillers بدون التأثير على صغر معاملات الإحتكاك لها.

وللمزيد من التفاصيل عن أنواع قواعد الكبارى يمكن الرجوع الى المرجع (22-11)



شكل (١١-٢٣) قاعدة ثابتة على شكل مخدة من مونة الأسمنت

١١-١٣-٢ وصلات التمدد Expansion Joints

يجب تصميم وصـلات التمدد فى نفس الوقت الذى تصمم فيه قواعد التحميل (Bearing) لتتم المؤالفة (Be compatible) . ويجـب أن يلقـى تصـميم وصــلات الـتمدد وأيضـا مـلء هـذه الوصــلات بيـنـها (Sealing) العناية الكافية لأهميتها وتأثيرها على أداء الكبارى.

وبالنسبة لكبارى الطرق التى لا يزيد طول بحورها عن ٢٠ متر فإنه يمكن استخدام وصلة تمدد تسمح بحركة فى حدود ٢٥ مم .

وبالنسبة للكبارى ذات البحور المتوسطة والتى تكون الحركة الأفقية منها فى حدود ٤٠ - ٥٠ مم فإنه يمكن استخدام وصلة تمدد مكونة من زوايا وصفائح من الحديد .

وتستعمل وصلات الأصابع (Finger joints) فى الكبارى التى تتطلب حركة أفقية فى حدود ١٥٠ مم. ويعتمد هذا النمط من وصلات التمدد على مجموعة من الأصابع المتشابكة المتصلة ببلاطة الكوبرى بواسطة قضبان ملحومة فى هذه الأصابع من أسفل. وفى بعض الأنماط الحديثة من هذه الوصلة فإن الأصابع تكون منشورية الشكل (Prismatic) ذات قطاعات مستطيلة أو مربعة.

وبالنسبة للكبارى ذات البحور الطويلة والكبارى المستمرة فيجب حساب أقصى حركة أفقية ممكنة من واقع أقصى فرق بين درجات الحرارة والعوامل الأخرى المؤثرة ثم تصمم وصلات تمدد خاصة للسماح بهذه الحركة.

ولكى يحقق نظام ملء فراغ وصلة التمدد (Joint sealing system) فى الكبارى ذات البحور الطويلة كفاءة فإنه يجب أن يحقق الشروط التالية :

أ- أن تتوافر له القابلية ليقاوم بنجاح آية توليفة (Combination) من الحركات العديدة التى يمكن أن تحدث فى الكبارى مثل الحركة النسبية بين جانبى الوصلة والحركات الأفقية والرأسية والدوران والصدم وغيرها.

ب- أن يكون مانعا لتسرب آية مادة غريبة بما قد تحتوية من كيماويات ضارة بالخرسانة لأجزاء الكوبرى.

ج- أن يكون مانعا لنفاذ الماء.

د- أن يكون قادرا على امتصاص الأنماط المختلفة من الحركة دون أن يبرز خارج فراغ الوصلة.

هـ- أن يكون السطح الخارجى لنظام الملء من مادة مقاومة للتآكل والصدم الناتجين عن حركة المرور الثقيلة والمتكررة بالإضافة لمقاومة المواد البترولية الناتجة عن هذه الحركة.

و- أن يكون قادرا على الأداء بنفس الكفاءة فى درجات الحرارة العظمى والصغرى.

ز- أن يكون العمر الافتراضى له مساويا للعمر الافتراضى للكوبرى.

ويمكن إيجاز بعض المصادر الرئيسية للحركة فى الكبارى فيما يلى :

١- الحركة الأفقية الناتجة عن تغير درجات الحرارة.
٢- حركة فتح وغلق وصلة التمدد.
٣- الحركة الاهتزازية الناتجة عن حركة المرور الثقيلة.
٤- الحركة الدورانية لنهايات بلاطة الكوبرى.

وعموما فإنه يجب تقدير قيمة الحركة بعناية ثم تصميم وصلة التمدد ونظام ملء الوصلة لمقارمة هذه الحركة مع الأخذ فى الاعتبار معامل أمان مناسب.

وللمزيد من التفاصيل عن أنواع وصلات التمدد فى الكبارى يمكن الرجوع الى المرجع (22-11)

١١-١٣-٣ الدرابزينات Handrails

تستخدم الدرابزينات على جانبى الكبارى للحفاظ على مستخدمى الكبارى من السقوط لأسفل. ونظرا لأن هذه الدرابزينات تكون دائما ظاهرة للعيان فإنها يجب أن تكون ذات شكل جمالى مناسب. ويمكن أن تكون هذه الدرابزينات من الحديد أو من الخرسانة المسلحة

ويجب أن تتوافر للدرابزين المقاومة الكافية لمنع سقوط السيارة التى ترتطم به من أعلى الكوبرى على أن يكون فى نفس الوقت ذا مرونة كافية لامتصاص طاقة الاصطدام مع أقل تلف ممكن للسيارة المرتطمة وأقل إصابات لراكبى السيارة.

وغالبا ما يتم تزويد مصاعد ومهابط الكوبرى (Approaches) بدرابزينات وخاصة إذا كانت هذه المصاعد والمهابط مرتفعة المستوى أو فى منحنيات.

١١-١٤ الإنشاء والصيانة

١١-١٤-١ طريقة الإنشاء وتأثيرها على تكلفة الكوبرى

تختلف التقنية المناسبة المستخدمة فى إنشاء الكبارى من موقع لأخر وتعتمد على بحر الكوبرى ونمط الكوبرى (Type) والمواد المستخدمة فى إنشائه وأيضا على ظروف الموقع. وعلى سبيل المثال فإن الخرسانة سابقة الصب يمكن إستخدامها فى الكبارى ذات البحور حتى ٤٠ متر بشرط جفاف قاع النهر لفترات طويلة على مدار العام بينما تستخدم الخرسانة سابقة الإجهاد فى إنشاء الكبارى ذات البحور الطويلة عبر الأنهار ذات المتطلبات الملاحية. والإتجاه الحديث فى إنشاء الكبارى يتجه نحو تفادى الشدات (Staging) بقدر الإمكان وإستخدام العناصر سابقة الصب أو سابقة التجهيز إلى الحد الأقصى أو استخدام الكبارى المعلقة أو الكبارى الملجمة. كما يتم الاعتماد أيضا على معدات الإنشاء الحديثة مثل الأوناش وكمرات التعويم (Launching girders) . ويؤدى الإختيار الأمثل لطريقة إنشاء الكوبرى إلى توفير كبير فى تكلفة الكوبرى.

١١-١٤-٢ الكبارى ذات البحور القصيرة

يمكن إنشاء الكبارى ذات البحور حتى ٤٠ متر على شدات (Staging) ترتكز على الأرض. كما يمكن إستخدام الكمرات سابقة الصب بطول البحر ويتم تركيبها فى الموقع بإستخدام الأوناش أو كمرات التعويم (Launching girders) وذلك إذا كان الكوبرى مكونا من عدة بحور متساوية الطول. ولإستخدام هذه التقنية يجب أن تكون زيادة التكلفة نتيجة إستخدام المعدات أقل من الوفر فى تكلفة الشدات والعمالة اللازمة لها.

١١-١٤-٣ الكبارى المعدنية

تستخدم تقنيات عديدة فى إنشاء الكبارى المعدنية. حيث تستخدم الشدات فى إنشاء الكبارى الجمالونية (Truss bridges) بينما تستخدم شدات متفرقة عند الوصلات بين الأجزاء سابقة التصنيع (Prefabricated segments) للكبارى اللوحية المستمرة (Continuous plate girder bridges) كما تستخدام طريقة الكابولى (Cantilever construction) فى إنشاء الكبارى الجمالونية ويستخدم كابل ارتكاز مؤقت (Temporary cable support) فى انشاء الكبارى المقوسة (Arch bridges).

وللوقوف على التفاوتات (Tolerances) المسموح بها فى إنشاء الكبارى المعدنية يمكن الرجوع إلى الباب الرابع عشر من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية. وفيما يختص بالاجهادات المتولدة فى الكبارى المعدنية أثناء التنفيذ (Erection stresses) يمكن الرجوع إلى البند ٣-٣-٥ من الباب الثالث من نفس الكود لممارسة المنشأت . كما يمكن الرجوع إلى الجزء الثانى من الكود المصرى لممارسة المنشآت والكبارى الحديدية فيما يختص بتصنيع وإنشاء وتشطيب (Finishing) الكبارى المعدنية.

١١-١٤-٤ الكبارى الخرسانية ذات البحور الطولية

عادة ما تكون الكبارى الخرسانية ذات البحور الطويلة من الخرسانة سابقة الإجهاد ذات الشد المؤخر وتنفذ إما على شكل كمرة مستمرة أو كمنشأ كابولى حر.

وتوجد عدة طرق لتنفيذ الكوبرى المستمر. فتستخدم الشدات إذا كان الخلوص الرأسى بين منسوب الأرضية وباطن الكوبرى صغيرا وكانت التربة متماسكة. وإن كانت هذه الطريقة قد ندر إستخدامها ويستخدم بدلا منها نظام السقالة المتحركة (Movable scaffold) والكابولى الحر (Free cantilever) . ويستخدم هذا النظام شدات متحركة مربطة بإطارات معدنية حيث تمتد هذه الشدات لمسافة بحر واحد. وترتكز هذه الشدات على كمرات معدنية ترتكز بدورها على دعامة (Pier) عند أحد أطرافها. ويمكن تحرك هذه الكمرات من بحر لأخر بواسطة مجموعة من الكمرات المساعدة عند الطرف الأخر. وفى هذه الطريقة يجب أن تكون الوصلة الإنشائية للكوبرى (Construction joint) على بعد حوالى ٠,٢ البحر من الدعامة (Pier) (نقطة إنقلاب عزم الإنحناء الناتج من الأحمال الميتة). كما يمكن إستخدام أسلوب مشابه لذلك باستعمال دعائم رأسية مساعدة من الحديد المربط .

ويمكن أيضا إستخدام الأسلوب الإقتصادى المتطور المعروف بإسم الدفع والتعويم التدريجى (Incremental push-launching method) فى إنشاء الكبارى الخرسانية ذات البحور الطويلة. ويصلح هذا الأسلوب فى الكبارى المستقيمة والمنحنية (Curved) المستمرة ذات البحور حتى ١٢٠ متر.

كما يمكن إستخدام نظام الكابولى الحر (Free cantilever system) فى إنشاء الكبارى الخرسانية ذات البحور الطويلة حيث يتميز هذا النظام بالسرعة فى التنفيذ والتوفير فى العمالة اللازمة وتفادى وجود شدات سفلية مما يجعله من أكثر النظم إقتصادا فى إنشاء الكبارى.

١١-١٤-٥ الشدات والفرم للكبارى

للوقوف على الاشتراطات الخاصة بتصميم الشدات والفرم وفك هذه الشدات والفرم يتم الرجوع إلى البند ٩-٤ من الباب التاسع من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

١١-١٤-٦ إدارة التشييد

يتوقف نجاح تنفيذ أى كوبرى على إدارة عملية التنفيذ بكفاءة عالية وذلك بإستخدام جميع العناصر الإستخدام الأمثل وذلك فى فترة زمنية محددة وبتكلفة إقتصادية. وللوقوف على العناصر الأساسية اللازمة لتنفيذ مشروع كوبرى وتحقيق البرنامج الزمنى له يتم الرجوع إلى البند ٩-٩ من الباب التاسع من الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

١١-١٤-٧ الصيانة Maintenance

يعتبر إنشاء الكبارى من الاستثمارات القومية الهامة التى يجب الحفاظ عليها. والعمر الافتراضى الطبيعى المتوقع للكوبرى يكون فى حدود ٧٠ عام للجزء العلوى للكوبرى (Superstructure) وفى حدود ١٠٠ عام للجزء السفلى من الكوبرى (Substructure) . ويقل هذا العمر الافتراضى بشدة إذا ما أهملت صيانة الكوبرى. ولذلك فإنه من الأهمية بمكان توفير الصيانة الدقيقة واللازمة للكبارى. وتتحقق هذه الصيانة بالفحص الدورى لجميع عناصر الكوبرى وتقييم نتائج هذا الفحص بطريقة علمية دقيقة.

ويمكن تصنيف الفحوصات التى يجب إجراؤها على الكبارى إلى النمطين التاليين :

أ- فحص روتينى (Routine inspection) .
ب- فحص متعمق (In-depth inspection) .

ويطبق النمط الأول على الكبارى ذات البحور القصيرة ويتضمن فحصا عاما للمنشأ للوقوف على العيوب التى تتطلب إصلاحا (Repair) أو صيانة خاصة. ويتطلب النمط الثانى فحصا بصريا مفصلا لجميع

عناصر الكوبرى العلوية والسفلية (Superstructure and substructure elements) . ويطبق هذا النمط من الفحص على الكبارى القديمة وأيضا الكبارى الرئيسية الهامة التى يؤدى حدوث انهيار بها إلى كارثة. ويجب إجراء هذا الفحص دوريا كل ٣ - ٥ أعوام. وعناصر الكوبرى التى تتعرض عادة للاضرار تتركز فى الأساسات والقواعد ونظام الأرضية والوصلات وأعضاء الجمالون.

وفى خلال الفحص للكبارى يجب التركيز على التأكد من :
١- التدهور (Deterioration) والشروخ فى الخرسانة.
٢- هبوط وتحرك الأساسات.
٣- الشروخ فى الكبارى المعدنية.
٤- تفكك الوصلات.
٥- الأعضاء التالفة.
٦- حاله الإصلاحات السابقة فى الكوبرى.
٧- الاهتزازات المفرطة.
٨- الإجهادات بالقرب من وصلات التمدد.
٩- المناطق التى ظهرت بها مشاكل فى المنشآت المماثلة.
ويعتبر إضافة طبقة رصف جديدة للكوبرى والتى تتم من فترة لأخرى عاملا سلبيا من عوامل صيانة الكوبرى والذى ينتج عنه زيادة فى الأحمال الميتة للكوبرى لم تؤخذ فى الاعتبار عند التصميم.

١١-١٥ المراجع

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): "Standard Sperifications for Highway Bridges", Washington, D.C.,(1977).
2. Bakht, B., and Jaeger, L. G., "Bridge Analysis Simplified", McGraw Hill Book Company, (1985).
3. Bakht, B., and Csagoly, P.F, "Load Carrying Capacity of Highway Bridges", 3rd IABSF Conference on Structural Safety and Reliability, Trasdheim, Norway, (1981).
4. Bakht, B., Jaeger, L.G., and cheung, M.S., "Celluler and Veided Slab Bridges", Journal of the structural Division, ASCE, 107 (ST9), pp.1797-1813, (1981).
5. Barltrop, N.D., and Adams, A.J., "Dynamic of Fixed Marine Structures", Marine Technology Directorate Limited, EPSON, U.K, (1991),.
6. Beckett, D.,"Great Buildings of the World-Bridges", Paul Hamlyn, London, 191 pp.,(1969).
7. Blake L.S., "Civil Engineer's Reference Book", Newnes Butterworth, London, Third Edition, (1975).
8. Bruce, R.N., and Hebert, D.C., "Splicing of Precast Prestressed Concrete Piles: Parts 1 and 2", Journal of Prestressed Concrete Institute, Vol.18, pp70-87. Sept.-Oct., (1974), and No.6, pp.40-66, Nov.-Dec., (1974)
9. Chettoe, C.S., and Adams, H.C., "Reinforced Concrete Bridge Design", Chapman & Hall, London, 416pp., (1952).
10. Cheung, M.S., Bakht , B., and Jaeger, L.G., "Analysis of Bos , Girder Bridges y Grillag and Orthotropic plate Methods", Canadian Journal of Civil Engineering, 9(4), pp.595-601, (1982).
11. Comstock, C.E., "Inspect Bridges Now, Avoid Problems Later", Civil Engineering, ASCE, Vol.41, No.11, pp.66-68, Nov., (1971).
12. Cusens,A.R. and Pams, R.P.,"Bridge Deck Analysis", Willey-London, (1975).
13. Finsterwalder, U.,"Free-Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges and Mushroom-Shaped Bridges, First International Symp. on Concrete Bridge, ACI Publication SP-23, Detroit, pp.467-494, (1969).
14. Finisherwalder, U., "Prestressed Concrete Bridge Constructions", Journal of ACI, Proc. V. 26, No.9, pp1037-1046, (1965).
15. Goel, I.B., Thomas A., and Wele, S.M., ,"Analysis for Superstructure of Flooting Bridge", Proc. Of Seminar on Design, Development and Production of light weight Bridges, paper No.15, (1975).

16.Hansen, F.J., ”How Important is the Construction Method?”, Developments in Bridge Design andn Construction, Rockey, R.C., et.al.Ed., Crosby Lockwood and Son Ltd., London, pp599-607, (1971).
17.Hool, G.A. and Kinne, W.S., ”Steel and Timber Structures”, McGraw-Hill Book, Co., New York, 733pp., (1942).
18.Indian Railway Standard Code of Practice for the Design and Construction of Masonry and Plain Concrete Arch Bridges (Arch Bridge Code), Gavt. of India, Ministry of Railways, 8pp., (1965).
19.IRC:5, “Standard Specifications and Code of Practice for Road Bridges: Section I-General Features of Design”, Indian Roads Congress, 30 pp., -(1970).
20.Iaeger, L.G., and Bakht, B., ”The Grillage Analysis in Bridge Analysis”, Canadian Journal of Civil Engineering, 9(2), pp.224-235, (1982).
21.Lee, D.J., “The theory and Practice of Bearings and Expansion Joints for Bridges”, London, Cement and Concrete Association, pp.65, (1971).
22.Lee, D.J.,”The theory and Practice of Bearings andn Expansions joints for Bridges”. Cement and Concrete Associations, London, 65pp., (1971).
23.Leonhardt, F., ”Prestressed Concrete-Design and Construction”, Wilhelm Ernst & Shon, Berlin, Second Edition, 677pp., (1964).
24.Libby, J.R., “Prestressed concrete-Design and Construction”, Ronald Press, New York, 468 pp., (1961).
25.Lin, T.Y., ”Design of Prestressed Concrete Structures”, John Wiley & Sons, New York, Second Edition, 614 pp., (1963).
26.Long, J.E., ”Bearings in Structural Engineering”, Newnes-Buttersworth, London, 162 pp., (1974).
27.Muller, J., ”Long-Span Precast prestressed concrete Bridges Built in Cantilever”, First International Symp. on concrete Bridge Design, ACI Publication, SP-23, Detroit,pp 705-740, (1969).
28.Newmark, N.M., “Design of I-bean D’ridges, Highway Bridges Symposium, Journal of the Structural Division, ASCE, 74 (ST1), March, pp.305-331, (1948).
29.Niels J. Ginsing, “Cable supported Bridges – Concept and Design”, John Wiley & Sons, (1983).
30.O’connor, C., ”Design of Bridge Superstructures”, Wiley- Interscience, New York, 522 pp., (1971).
31.Plowden, D., ”Bridges – The Spans of North America”, The Viking Press, New York, 328 pp., (1974).
32.Pugsley, A,”The Theory of Suspension Bridges”, Edward Arnold, London, (1957).
33.“Recommendations of Estimating the Resistance of Soil Below the Maximum Scour Level in the Design of Well Foundations of Bridges”. Indian Roads Congress, New Delhi, 27pp., (1972).

34. Rowe, R.E., “Concrete Bridge Design”, C.R. Books Ltd., London, First Edition 336 pp., (1962).
35. Sanders, W.W., and Elleby, H.A.; “Distriubution of Whell Loads on Hydrulaics Report 84, Ttansportation Research Board, Washigton, (1970).
36. Sarpkaya, T., and Isaaccon, M., “Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures”, Van Nostrand Reinhold, New York, (1981).
37. Saxena, R.K., “Well Foundations for Road Bridges”, JL, Indian Roads Congress, Vol. 34, No.2, pp.391-435, (1971).
38. Sawko, F., and Mills, J.H., ”Design of Cantilever Slabs for spine Beam Bridges”, Developments in Bridge Design and Construction, Proceedings of the Cardiff Conference, Crosby Lockwood, London, (1971).
39. Steinnan, D.B., and Watson, S.R., ”Bridges and Their Builders”, Dover Publications, New York, 401 pp., (1957).
40. Thillainayagam, R., “Traffic Aspects of Highway Bridges”, Transportations Structures Series No.15, Indina Institute of Technology, Madras, 36 pp., (1972).
41. U.I.C., Code 772 R, “Code for the Use of Rubber Bearings for Rail Bridges”, International Union for Railways, Paris, 56pp., Jan., (1968).
42. Victor, B.J., , ”Essentials of Bridge Engineering”, Oxford & IBH Publishing Co., (1978).
43. Victor, D.J., ”The Investigation, Design and Construction of Submersible Bridges”, JL. Indian Roads Congress, Vol.XXIV-I, pp.121-213, Oct., (1959).
44. Virola, J., “The World’s Greatest Bridges”, Civil Engineering, ASCE, Vol. 38, No. 10, PP. 52-55, (1968).
45. Victor, D.J., and Lakshmanan, N., “Reactions in Three Girder Bridge Decks”, Journal of Indian Roads Congress, Vol.36-1, Paper No. 229, pp.41-68, (1973).
46. “World’s Longest Pile?”, Foundation Facts, Raymond International Inc., Vol.VII, No.i, p20., (1971).

الباب الثانى عشر
الأنفاق Tunnels

١٢-١ مقدمة

يطلق لفظ الأنفاق على المنشآت تحت سطح الأرض والتى تستخدم كوسيلة عبور مناسبة لتفادى العوائق والصعوبات الطبيعية أو المخاطر مثل المناطق الجبلية والأنهار والبحار حيث تسمح هذه الأنفاق بالعبور فى جميع الأوقات بصرف النظر عن الظروف الجوية. وتتنوع الأغراض التى تستخدم من أجلها الأنفاق لتشمل ما يلى :

أ- أنفاق حركة المرور (Traffic tunnels) مثل أنفاق السكك الحديدية وأنفاق تقاطعات الطرق الرئيسية وأنفاق المشاة والأنفاق الملاحية.

ب- أنفاق الخدمات (Conveyance tunnels) مثل أنفاق نقل الطاقة الكهربية بين المحطات وأنفاق إمدادات المياه (Water supply tunnels) وأنفاق الصرف الصحى وأنفاق الصناعة (Industrial plant) وأنفاق المنافع العامة (Public utilities : intake and conduits).

ج- أنفاق استخراج المعادن (Mining Tunnels) مثل أنفاق الدخول وأنفاق الاستكشاف وأنفاق الاستغلال (Exploitation) وأنفاق الصرف لمخلفات المناجم وأنفاق الخدمة.

وتعد الأنفاق فى الوقت الحالى عنصرا أساسيا من عناصر الحياة اليومية فى الدول المتحضرة وتتسع الأغراض التى تستخدم من أجلها الأنفاق لتشمل أفاقا جديدة بإنتشار العمران ولخدمة المجتمعات الجديدة. وتعتمد المعلومات الواردة فى هذا الباب على المراجع المذكورة فى نهاية الباب وبصفة أساسية على المرجع (12-3).

١٢-٢ العناصر الرئيسية اللازمة لتخطيط وتصميم الأنفاق

يتطلب تخطيط وتصميم مشروع نفق ما اشتراك وتفاعل العناصر التالية :

أ- المجالات الجيولوجية حيث يجب أن يتضمن التقرير الجيولوجى نتائج المسح الجيولوجى والجيوفيزيائى (Geophysical) لموقع النفق.

ب- أبحاث وهندسة التربة الخاصة بموقع النفق حيث يجب أن يتضمن تقرير أبحاث التربة جميع التفاصيل الخاصة بخصائص التربة وتحليل نتائج الإختبارات الحقلية والمعملية وتأثير هذه الخصائص على عملية حفر النفق (Tunneling process).

ج- تقرير خاص بحالتى المياه الجوفية والسطحية (Hydrogeological and ground water report).

د- خرائط مساحية سطحية دقيقة ومفصلة لموقع النفق.

هـ- التقنية التى سوف تستخدم فى حفر النفق (Excavation technology) والآلات المستخدمة فى الحفر (Tunneling machine) مع توضيح للقطاعات المختلفة طبقا لاختلافات ظروف وخصائص التربة على امتداد طول النفق.

و- الوثائق التصميمية الخاصة بطرق الحفر المستخدمة (Types of excavation methods) والتبطين المحتمل وضعه (Tunnel supports) لسند النفق موضحا بها طبيعة وعدد نقاط الربط وتفاصيل التبطين.

ر- برنامج القياسات الحقلية لتشوهات قطاع النفق (Monitoring of the tunnel).

ز- مسح للمنشآت القائمة التى يمكن أن تتأثر بعملية حفر النفق مع ملاحظة وتوثيق حالة هذه المنشآت قبل وأثناء وبعد إتمام عملية حفر النفق. وكذلك مسح للخدمات الأخرى الموجودة مثل الآبار والكابلات والمواسير وغيرها.

ط- تحليل للإجهادات والتشوهات فى النفق غير المبطن (Unlined) وأيضا بالنسبة للنفق أحادى أو ثنائى التبطين (Single or double lined) مع تفاصيل ركائز سند النفق (Tunnel support) فى المراحل المتوسطة للتبطين وفى حالة التبطين النهائى.

ى- التصميمات الخاصة بمانع وصول المياه إلى النفق (Water proofing) أو بنظام تصريف المياه (Drainage).

ك- التصميمات الإنشائية النهائية الخاصة بمشروع النفق شاملة كافة التفصيلات.

ل- تقارير دورية أثناء الحفر وبعد الانتهاء منه تشتمل على قياسات للتربة وتحليل لنتائج هذه القياسات لمعرفة رد فعل الأرض (Response of the ground) ولتقدير الأمان الإنشائى لجسم النفق.

م- توثيق لجميع المشاكل التى تعترض عمليات الحفر والحلول التى تم تطبيقها لتجاوز هذه المشاكل مثل تقوية الأرض (Strengthening the ground) أو تغيير نمط النظام المصمم لسند النفق فى وثائق المشروع وذلك استنادا إلى نتائج القياسات الحقلية (Monitoring results) .

١٢-٣ مكونات النموذج الإنشائى لتصميم الأنفاق

يجب أن يتوخى المهندس عند تخطيط وتصميم وتحليل وإعداد تفاصيل مشروع نفق ما أن لايتعرض هذا النفق لمشاكل إنشائية أو للإنهيار أثناء العمر الإفتراضى الإنشائى له. ولذلك فإن نماذج إنشائية للأنفاق الحقيقية يجب أن تخضع للتحليل للتنبؤ بسلوك هذه الأنفاق خلال عمليات الحفر وأيضا خلال العمر الإفتراضى له.

وعادة ما يتبع الأسلوب التكرارى (Iterative) أو ما يعرف بأسلوب الخطوة - خطوة فى تصميم الأنفاق حيث يبدأ المهندس المصمم بإفتراض نموذج إنشائى مبسط لسلوك النفق ثم يتم تعديل هذا النموذج أثناء عملية الحفر طبقا للقياسات (Monitoring) والتجارب الحقلية ليتوافق سلوك النموذج الإنشائى مع السلوك المرصود عمليا.

ويجب الأخذ فى الاعتبار أن تعمل جميع مكونات النموذج الإنشائى كوحدة واحدة حيث أن عدم دقة مكون واحد فى هذا النموذج تؤثر على دقة النموذج كله. لذلك فإن تعديل النموذج ليلائم السلوك الحقيقى للنفق يجب أن يشمل جميع المكونات بنفس الدرجة لضمان تجانس النموذج. فمثلا إستخدام علاقات رياضية متقدمة فى عمل النموذج مع إفتراض قيم تقريبية للخصائص الهامة للتربة يجعل النموذج غير متجانس. ويتم الاعتماد على الخبرات المتقدمة لمهندس تصميم الأنفاق فى ذلك.

١٢-٤ الدراسات الجيوتقنية الحقلية وإختبارات التربة

١٢-٤-١ مقدمة

يختلف مقدار الدراسات الحقلية وإختبارات التربة المطلوب القيام بها اختلافا كبيرا من مشروع نفق لأخر. وتتوقف طبيعة هذه الدراسات على نوع النفق والإستخدامات المقررة له وطريقة الحفر وغيرها. ويجب أن يتم تقدير مقدار الدراسات الحقلية وإختبارات التربة المطلوبة وطبيعتها بواسطة هيئة استشارية ذات خبرات كافية فى هذا المجال وذلك بالاشتراك مع المهندس المصمم.

وتعتمد كثافة الاستكشافات الجيوتقنية على تجانس الأرض فى موقع المشروع والغرض من النفق وتكلفة جس الأرض (والتى تعتمد بدورها على عمق النفق أسفل منسوب سطح الأرض) وغيرها من العوامل. وتمثل الدراسات الجيولوجية ركيزة فى مشاريع الأنفاق حيث يتوقف على نتائجها إختيار طريقة إنشاء النفق وتصميمه الإنشائى وآمان هذا التصميم وأيضا طريقة تشغيله وصيانته.

وتتوقف المعلومات التى يجب أن توفرها الدراسات الحقلية على طبيعة الأرض التى يتم حفر النفق بها وما إذا كانت تربة أو صخوراً.

١٢-٤-٢ الأنفاق فى الصخر

يتم تقسيم الأرض على طول خط النفق إلى مجموعة مناطق (Zoning) كل منها ذات خصائص تصميميه موحدة (Uniform) على أن تكون هذه الخصائص واضحة التباين بين كل منطقة والتى تليها.

ويتم تحديد الملامح والخصائص التالية لكل منطقة :

- أسم التكوين الجيولوجى طبقا لتصنيف جينى (Genetic classification).
- البناء الجيولوجى وطبيعة الكسر (Fracturing) فى الكتلة الصخرية فى الاتجاهات الرئيسية والاتجاهات المائلة.
- اللون والنسيج (Texture) والتكوين المعدنى للصخر.
- درجة التآكل (Weathering).
- سمك الطبقات فى الكتلة الصخرية.
- الجزء المحصور بين الكسور فى الكتلة الصخرية (Fracture intercept).
- تصنيف الصخور بالكتلة الصخرية.
- مقاومة الصخر للضغط مقدرة بإختبارات معملية.
- زاوية الاحتكاك للكسور فى الكتلة الصخرية (Angle of friction for the fraction) مقدرة بإختبار القص المباشر فى المعمل (Direct shear test).
- مقاومة التربة المتواجدة أعلى الصخر.
- طبيعة وخصائص ومعاملات التشوهات فى الصخر (Deformation properties).
- تأثير المياه على نوعية الصخر (Quality).
- السرعة الزلزالية فى الكتلة الصخرية (Seismic velocity).

وبالنسبة لمشروعات الأنفاق الضخمة فإن تقدير الإجهادات الطبيعية للكتلة الصخرية (Natural stresses) يمكن أن تكون ذات فائدة كبيرة. أما بالنسبة لمشروعات الأنفاق العادية فيجب على الأقل تقدير النسبة $\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ عند منسوب النفق حيث σ_h هى قيمة ضغط الأرض العرضى و σ_v هى قيمة الإجهاد الرئيسى الأقصى (عادة ما يكون فى الاتجاه الرأسى).

ومن خلال تلك الملامح والخصائص يتم تحديد قيم معاملات جيوتقنية أخرى منها على سبيل المثال معامل (ϕ) والذى يمكن من خلاله تصنيف نوع الصخر مباشرة أثناء حفر النفق والذى يتم على أساسه تحديد نوع التبطين المناسب له

كما يجب توافر المعلومات الآتية عن حالة المياه فى موقع النفق :

- النفاذية : وتحسب عن طريق معامل النفاذية (k) م / ث (ويحدد بإجراء إختبارات حقلية) وأيضا عن طريق وحدة ليجون (Lugeon unit) وتحسب بإختبارات فى ثقوب فى الصخر (Boreholes).

- ضغط الماء : وذلك عند منسوب النفق (الارتفاع الهيدروليكى) وعند ارتفاعات بيزومترية (Piezometric levels) فى الثقوب (Boreholes).

كما يجب إجراء تجارب حقلية فى موقع النفق لتعيين معاملين مختلفين للتشكل (Deformation module) يتم تحديدهما إما بإستخدام طرق أستاتيكية أو بإستخدام طرق ديناميكية. وهنا يجب أن يطبق الحس الهندسى (Engineering judgement) لإختيار قيمة معامل التشكل الأكثر ملائمة للتصميم (مثلا عن طريق المماس المناسب لمنحنى العلاقة بين الضغط والتشكل عند منسوب الإجهاد الأولى (Primary) فى الطريقة الإستاتيكية).

ومن الخصائص التى يجب توافر معلومات عنها إذا ما استخدمت ماكينات حفر للنفق :
- التآكل والصلادة (Abrasiveness and hardness).
- التكوين المعدنى (محتوى الكوارتز مثلا).
- التجانس.

كما يجب فحص قدرة الانتفاخ الكامنة للصخر (Swelling potential of the rock) لذلك يجب إختبار وجود الكبريتات والأكسجين المائى (Hydroxides) أو المعادن الطينية (Clay minerals) ويتم رسم منحنى انتفاخ (Swell test curve) لعينة من الصخر معرضة لدورة (تحميل - عدم تحميل - تحميل) فى حالة جفاف ثم عدم تحميل مع وجود الماء.

ويفيد فى بعض الأحيان توافر معلومات عن التركيب الكيميائى للماء الجوفى ودرجة حرارة هذا الماء وأيضا الكمية المتوقعة لحركة سريان المياه الجوفية (Water inflow).

١٢-٤-٣ الأنفاق فى التربة

يجب الالتزام هنا بالتوصيات الواردة فى البند السابق (١٢-٤-٢) والخاص بالأنفاق فى الصخر بالإضافة إلى الخصائص التالية الخاصة بالتربة :

١- تحديد نوعية التربة(Soil identification) وتتم عن طريق الإختبارات المعملية وتشمل :
- تدرج حبيبات التربة.
- حدود إتربرج للتربة (Atterberg limits).
- وحدة الأوزان (الجافة والمغمورة).
- محتوى الماء.
- النفاذية.

٢- الخصائص الميكانيكيةالتى تحدد عن طريق الإختبارات المعملية والحقلية وتشمل :
- مقاومة القص.
- الاختراق (إختبار الاختراق القياسى - Standard penetration).
- قابلية التشكل (Deformability) وتقدر بمعامل المرونة.

ويمكن إتباع عناصر البرنامج الاستكشافى التالى للحصول على الملامح والخصائص والمعلومات السابق ذكرها للأنفاق فى كل من الصخور والتربة

١- الرجوع إلى الكتب والمؤلفات والأبحاث والمحفوظات للوقوف على المعلومات الخاصة بمنطقة مشروع النفق مع مراجعة تاريخ هذه المنطقة ودراسة المشروعات والإنشاءات الهامة التى أقيمت بالمنطقة ومدى ملاءمتها للموقع.

٢- دراسات التصوير الجوى (Aerial photography) حيث تؤدى الصور الجوية إلى :
- توفير مجال واسع للرؤية لمنطقة المشروع.
- التعرف على طبوغرافية المنطقة وأسلوب الصرف (Drainage pattern) للمياه والطبيعة النباتية (Vegetation) وإستخدامات الأرض ومصادر المواد المستخدمة فى التشييد والبناء.
- تحديد طبيعة الميول الطبوغرافية.
- التعرف على الانهيارات الأرضية (Landslide) والفوالق (Faults) والتكوينات المحدبة والتكوينات المسطحة والتكوينات المقببة.

وتمثل الصور المجسمة أهمية خاصة كما أن صور الأشعة تحت الحمراء توضح مجارى المياه الجوفية والينابيع.

٣- استطلاع جيولوجية السطح وذلك عن طريق :
- خرائط جيولوجية سطحية.
- إضافة ما أظهره البحث فى الكتب والمؤلفات والمحفوظات وما أظهرته الصور الجوية إلى هذه الخرائط.
- التعرف على أنواع الصخور ومكوناتها وخصائصها التركيبية والنواحى الجيومورفولوجية(Geomorphological) ومقاومتها للتآكل (Weathering).

٤- دراسات الجغرافية الطبيعية (Geophysical)
- تتميز هذه الدراسات بكونها سريعة نسبيا وغير متلفة وتكاليفها قليلة وإن كانت نتائجها غير دقيقة.
- تكون هذه الدراسات ذات فائدة كبيرة فى مشاريع الأنفاق لتحديد الظروف الشاذة فى مسار النفق مثل الأودية المدفونة والمناطق المتآكلة وغيرها. والتى يتطلب التأكد منها إجرا دراسات مفصلة بطرق مباشرة مثل الانكسار الزلزالى (Seismic refraction) ، وحصر الانعكاسات (Reflection surveys) وطرق أخرى مثل Electrical resistivity soundings ، Gravity surveys ، Magnetic surveys.
- ويؤدى تطبيق الدراسات الزلزالية إلى :
  أ- تحديد نوعية المواد المكونة للتربة.
  ب- تحديد المواقع ذات الظروف الجيولوجية الشاذة
  ج- تحديد الأفق الصخرى للموقع (Bedrock horizon).
  د- المساعدة فى إختيار مواقع ثقب خروم الإختبار.
- تشمل التقنيات الجغرافية الطبيعية فى العمق (Downhole geophysical) كلا من كثافة النيوترون (Neutron density) ، قياس السرعة الزلزالية ، وأشعة جاما (Gamma rays) والمقاومة الكهربية (Electro resistivity) وأثبتت هذه التقنيات كفاءة جيدة فى دراسة ترتيب طبقات التربة والتركيب الجيولوجى وأنواع الصخور وإمكانية وجود كهوف أو مناجم قديمة. كما أن إستخدام كاميرات فى العمق (Downhole cameras) قد أثبتت فائدتها فى تزويد المعلومات فى حالات محددة.

٥- الحفر الاستكشافى (Exploratory drilling)
- يعد الحفر هو أكثر طرق الاستكشاف شيوعا فى الأعمال المدنية ويوفر معلومات جيولوجية خاصة بالموقع الذى يتم الحفر فيه.
- تحديد مواقع الحفر على طول خط النفق يتطلب عناية خاصة لزيادة المعلومات الناتجة عنه إلى أقصى حد ممكن.
- يجب أن يوفر الحفر الاستكشافى معلومات عن احتمالات وجود منخفضات طبوغرافية والمواقع المحتملة لتآكل عميق وغيرها.

- يوفر الحفر العميق فى موقع النفق معلومات عن أنواع الصخور والظروف الجيولوجية الخاصة على مسار النفق وهذا يساعد فى إعداد القطاعات الجيولوجية.
- استكشاف التربة العادية والتربة الرخوة يتم عادة لتحديد سمك ونوعية وخصائص النفق المناسبة للموقع.
- يتطلب برنامج الحفر فى الصخر تحديدا واضحا للمطلوب من هذا الحفر والذى يمكن أن يتضمن :
  - أ- تحديد الأنماط الجيولوجية طبقا لعلم طبقات الأرض.
  - ب- تحديد الخصائص الطبيعية للصخور.
  - ج- توفير معلومات عن نمط الكسر فى الصخور (Fracture pattern).
  - د- تحديد النفاذية وحالة المياه الأرضية (Groundwater).
  - هـ- توفير معلومات خاصة بالإجهادات عند المستويات المختلفة.
  - و- تقدير مقاومة الصخر للتفجير (Blasting) وللحفر الميكانيكى(Drilling) .
  - ر- توفير معلومات لتقدير وسائل السند المحتملة (Probable support requirement).
- قطاعات الجسات الابتدائية فى الموقع (Field borehole logs) الخاصة بالمعلومات الجيولوجية تمثل أهم وثائق الدراسات الحقلية حيث يتم فيها تسجيل جميع المعلومات المتاحة ولذلك يجب حسن تنظيمها لتسهيل البحث عن آية معلومة مطلوبة. ويشمل هذا التنظيم رسومات بيانية وأيضا أية ظواهر أو مشاهدات غير عادية.

ويجب أن تشتمل المعلومات المسجلة فى سجلات الحفر على البنود التالية وغيرها :

- أ- التوصيف الجيولوجى للصخور والمواد الأخرى المتضمنة.
- ب- توصيف ونتائج آية إختبارات حقلية تم إجراؤها.
- ج- رسومات تفصيلية لتكوينات مادة الصخر والخاصة بعلم الأحجار (Lithology).
- د- أداء عملية الحفر والسلوك الملاحظ عند الأعماق المختلفة.
- هـ- التقدير البصرى لكمية وطبيعة السائل المرتجع نتيجة الحفر.
- و- حالة وظروف المياه الأرضية (Groundwater).
- ز- آية متطلبات خاصة بشأن سند الحفر.

٦- حفر الإختبارات والممرات (Test pits and drifts)

- توفر مداخل لمناطق خاصة يتم عن طريقها استكشاف حالة الصخور وإجراء آية إختبارات عليها.
- يمكن إجراء تقييم شامل للصخور من خلال هذه الحفر والممرات.
- تمكن المقاولين من أخذ انطباعات أولية عن الظروف المتوقعة لإنشاء النفق.

٧- الإختبارات الحقلية فى الموقع (Insitu testing)

- تؤدى الإختبارات الميكانيكية التى تجرى على الصخور بالموقع إلى :
  - أ- تقييم السند والتسليح (Support and reinforcement) اللازمين للصخور فى المراحل المؤقتة والدائمة لإنشاء النفق.
  - ب- تقييم ثبات واستقرار الصخر (Stability) وبالتالى دراسة مدى الحاجة الى استخدام مسامير الصخور (Rock bolts) وتحديد نوعها وعددها وعمقها واسلوب استخدامها.
  - ج- تقرير الطرق الملائمة للحفر.
  - د- تعيين الخصائص الطبيعية للصخر والتى تساعد فى عملية تقييم إنشاء النفق.
- إختبارات لوح التحميل (Plate loading tests) تتيح تقييم سلوك التشكل للصخر والمرتبط بعملية إنشاء النفق كما أنها مؤشر للأحمال المتوقعة وكيفية توزيعها على النظام السائد للنفق (Support system).
- أنماط التشكل (Deformations) حول النفق يمكن قياسها بواسطة إستخدام أجهزة قياس تثبت فى جوانب الحفر أو بإستخدام ثقوب للرصد (Strain monitoring boreholes) توزع فى

الصخور المحيطة بالنفق. وتساعد هذه القياسات فى تقدير كمية السند المطلوبة (Support) ومدى كفاءة نظم السند المختلفة.

- تقدير الأحمال على نظم السند بواسطة خلايا الحمل (Load cells) أو آية أنماط أخرى من الأجهزة.

٨- الإختبارات المعملية

- حساب قيمة مقاومة الصخر وسلوك تشكله (Deformational behavior) فى حالتى الإجهاد الأحادى (Uniaxial) والإجهاد الثلاثى (Triaxial) وذلك قبل وبعد الانهيار (Pre and post failure states).
- تقييم معاملات المرونة للصخر (Elastic constants).
- تقدير خصائص الزحف للصخر (Creep).
- حساب قوة الوصلات فى الصخر (Rock joint).
- حساب قيم النفاذية والمسامية.
- تقدير كثافة الصخر وقابليته لفقد مقاومته نتيجة النحت والتآكل والعوامل الأخرى.
- صلابة الصخر وخصائص البرى.

١٢-٤-٤ تحديد معاملات التربة عن طريق جس التربة والإختبارات المعملية

يجب توخى العناية الشديدة عند تحديد خصائص التربة اللازمة لتصميم الأنفاق. وتعد الإختبارات الحقلية والتى تجرى على كتل كبيرة من التربة أكثر دلالة بصفة عامة من الإختبارات المعملية التى تجرى غالبا على عينات صغيرة من التربة يتم استخراجها وحفظها. ويقتضى التشتت الطبيعى فى نتائج الإختبارات تكرار عدد مناسب من الإختبارات (على الأقل ثلاثة إختبارات) لتحديد كل خاصية من خصائص التربة.

ويجب ضبط وتدقيق نتائج الإختبارات المعملية لتناسب ظروف الموقع ولذلك فإن كلا من حجم العينات ، وتأثيرات المياه الجوفية ، وعدم تجانس التربة فى الموقع ، وتأثير تشتت النتائج يجب أن يؤخذ فى الاعتبار. كما يجب أن تتضمن نتائج الإختبارات ما يدل على أن العينات التى أجريت عليها الإختبارات قد أخذت من تربة مقلقلة (Disturbed) أو غير مقلقلة (Undisturbed).

هذا ويعد الجزء الأول المنفذ من النفق فى العديد من الحالات بمثابة تجربة ذات مقياس رسم كبير (Large scale test) تنعكس الخبرات المكتسبة منها ليس فقط على الحفر التالى لهذا الجزء ولكن أيضا على التنبؤ بسلوك التربة. وفى حالات معينة فإن عمل حفر استكشاف أفقية (Horizontal boreholes) قد يسهل عملية جس الأرض كما يمكن عمل نفق إرشادى Pilot tunnel يستخدم كنفق إختبارات ويؤدى فى نفس الوقت مهمة الصرف (Drainage). وقد يتم الاحتياج إلى إختبارات أخرى خاصة تتعلق بطريقة تنفيذ النفق.

ويجب أن يوضح تقييم معاملات التربة التشتت المتوقع فى قيمها ، ولذلك فإنه طبقا لنظرية الاحتمالات يمكن استنتاج أن قيمة متوسطة لأى معامل تكون أكثر ملائمة فى التعبير عن هذا المعامل من القيمة المحسوبة عند أسوأ الحالات (Worst case).

ويجب تقييم المجموعة الكاملة من المعاملات التى تصف سلوك التربة والمحسوبة عند قطاع واحد من قطاعات النفق كوحدة شاملة يتم التأكد فيها من التجانس والانسجام بين المعاملات المختلفة. فعلى سبيل المثال فإن القيمة المنخفضة لمعامل المرونة للتربة فى قطاع ما تدل على ميل التربة فى هذا القطاع إلى السلوك اللدن (Plastic) وهذا بدوره يدل على قيمة قريبة من الواحد الصحيح لنسبة الإجهاد العرضى إلى الإجهاد الرأسى فى هذا القطاع ($\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$) . ولذلك فإنه يجب إختيار مجموعة متكاملة ومتوازنة من المعاملات بدلا من اعتبار كل معامل على حدة غير مرتبط بالمعاملات الأخرى.

١٢-٤-٥ تقييم وتوثيق نتائج الإختبارات

Interpretation of Test Results and Documentation

يجب توفير نتائج الإختبارات الحقلية والمعملية فى تقارير موثقة على صورة نتائج فعلية حقيقية. وإعتمادا على هذه التقارير فإن تقييما لهذه النتائج موافقا لعملية تنفيذ النفق الفعلية ومتطلبات نماذج التصميم والتحليل الإنشائى يكون ضروريا. وفى الوقت الذى يتم فيه التخطيط لإجراء الإختبارات فإن المجموعة الاستشارية والخبراء المنوط بهم تصميم النفق يجب أن يقرروا ما هى الخصائص والمعاملات اللازم تحديدها بواسطة هذه الإختبارات لتوصيف سلوك التربة وللإستخدام فى النموذج الرياضى للتصميم. وبالتالى تتوافر علاقة وثيقة بين القياسات والفحوصات الخاصة بالتربة وبين التصميم من جهة وبين درجة تدقيق نتائج الإختبارات وبين مخاطر إنشاء النفق (Tunneling risks) من جهة أخرى.
ويجب أن تظهر المستندات والوثائق مسار التقييم المنطقى الذى تم على أساسه استنتاج قيم التصميم من نتائج الإختبارات. وقد أثبتت هذه الطريقة فائدتها خاصة فى عملية إعداد العطاء للنفق حيث تؤدى إلى تكثيف المعلومات الخاصة بتوصيف التربة وتلك الخاصة بتصميم النفق ممثلة على شريط (Band) بطول محور النفق تحت رسم توضيحى للقطاع الطولى للنفق.

ويمكن أن تعد هذه الشرائط المركزة فى البداية للعطاء وللتصميم الابتدائى ثم يتم تحسينها وتنقيحها من خلال الخبرة المكتسبة أثناء التنفيذ ونتائج القياسات الحقلية لتشوهات قطاع النفق أثناء تنفيذه. ولكن من المهم النص بوضوح (وخاصة فى أوراق التعاقد) على أن هذه الشرائط تفتقد الكثير من المعلومات المناسبة والبعض الأخر تم تبسيطه ولذلك فإن التقارير الخاصة بالتربة والجيولوجيا والوثائق المتكاملة الأخرى يجب اعتبارها الوثائق الأصلية فى التعاقد.

١٢-٥ الطرق المختلفة لتنفيذ الأنفاق Tunneling Methods

يتأثر إختيار طريقة تنفيذ النفق بالعوامل التالية :

١- ظروف التربة (Ground conditions)

ويعتبر العامل الرئيسى ليس فقط فى إختيار طريقة التنفيذ المناسبة ولكن أيضا لأنه يمكن أن يضع قيودا صارمة على إستخدام بعض الطرق. ويمكن تصنيف ظروف التربة إلى ثلاثة أنواع رئيسية :

أ- تربة رخوة (Soft ground)

وتشمل الطين والزلط والرمل والصخور اللينة (Weathered rock) وتتميز بقابليتها للحفر اليدوى بسهولة.

ب- الصخور

وتتراوح بين الصخور ضعيفة المقاومة (١٠ - ٤٠ ميجا باسكال) إلى الصخور قوية المقاومة (١٥٠ - ٣٠٠ ميجا باسكال). وتتميز الصخور ضعيفة المقاومة بقابليتها للحفر الميكانيكى ولكن مع سند خاص لجوانب الحفر (Support considerations) فى حين قد تمتنع الصخور قوية المقاومة على الحفر الميكانيكى ولكنها تتطلب حدا أدنى من السند.

ج- الظروف المختلطة

أحيانا يكون الجزء العلوى من النفق واقعا فى التربة أو الصخور شديدة القابلية للتآكل (Heavily weathered rock) بينما يكون الجزء السفلى منه واقعا فى الصخر. ويؤدى هذا الوضع إلى مشاكل خاصة بماكينة الحفر المستخدمة وأيضا بنظام السند المؤقت لجوانب الحفر.

٢- حجم النفق (Tunnel size)

تختلف الأنفاق من الصغيرة (قطر أقل من ٠,٩ متر) إلى الكبيرة (قطر أكبر من ١٢ متر) ويؤدى زيادة حجم النفق إلى تغيير هام فى الطرق والتقنيات الخاصة بالحفر.

٣- شكل قطاع التنفيذ

دائرى أو بيضاوى أو شكل مركب حيث يمكن استخدام ماكينات الحفر فى الأشكال الدائرية عموماً ويصعب استخدامها للأشكال الأخرى.

٤- الظروف البيئية (Environmental aspects)

تؤثر ظروف البيئة تأثيرا كبيرا على إختيار طريقة تنفيذ النفق ، فمثلا طريقة الثقب والنسف (Drill and blast) تستخدم بحذر شديد إن لم تستبعد كليا فى المناطق الحضارية. وتتغير مناسيب المياه الجوفية وطرق صرف هذه المياه بأسلوب حفر النفق مما يمكن أن يؤثر على المنطقة السطحية المحيطة بالنفق. كما أن الانبعاث المستمر أو حتى المتقطع للمياه أو الغاز بالقرب من أو حتى بعيدا عن النفق والناتج من طريقة وأسلوب تنفيذ النفق يمكن أن يؤدى إلى مشاكل كثيرة.

٥- الظروف المحلية المتغيرة (Local variable conditions)

توافر المستخدمين والأفراد (Personnel) المناسبين للحفر ، وطبيعة الموقع والبنية التحتية (Infrastructure) كلها عوامل تؤثر فى إختيار طريقة تنفيذ النفق.

١٢-٥-١ طرق تنفيذ الأنفاق فى التربة الرخوة

Tunneling Methods in Soft Ground

عادة ما يستخدم أسلوب درع (ماسورة) الوقاية (Shield) فى تنفيذ الأنفاق فى التربة الرخوة وذلك لتوفير الأمان للقائمين على عملية التنفيذ وأيضا كفاءة حفر النفق. ويتغير هذا الدرع طبقا للطريقة المستخدمة فى الحفر ولكن تظل وظيفة هذا الدرع بدون تغيير. ولا يستخدم هذا الدرع فى بعض الأنفاق الثانوية فى التربة وفى العديد من الأنفاق فى مناطق التعدين كما لا يستخدم فى الأنفاق التى تحفر فى الصخور القوية حيث لا تستدعى ظروف التنفيذ إستخدام هذا الدرع.

والعملية الرئيسية فى تنفيذ الأنفاق تتمثل فى حفر الأرض المرتبط بالسيطرة الفورية على مقدمة النفق (Tunnel face) والتربة حول محيط النفق (Periphery) بواسطة نظام سند مؤقت كفء (Effective support) ويلى ذلك إزالة ناتج الحفر ثم إنشاء نظام السند الدائم (Permanent support system).

١٢-٥-١-١ الدرع المفتوح Open Shield

يوضح الشكل (١٢-١) الملامح الإنشائية الرئيسية للدرع المفتوح والذى يتكون من ثلاثة أجزاء : جسم الدرع ، ذيل الدرع وحافة القطع (Cutting edge). ويشيد الدرع ليأخذ نفس شكل قطاع النفق غير أن الأخير يكون أكبر قليلا. ويعتبر الشكل الأسطوانى هو الأعم إستخداما رغم ميله للتدحرج أثناء تقدم الدرع فى حين أن شكل القوس (Arch) أو حدوة الحصان رغم عدم تعرضهما لهذا التدحرج فإن استعمالهما محدود جدا. ويتكون جسم الدرع من أسطوانة من الصلب (Steel cylindrical shell) مقواه بأعصاب (Ribs) وبأعضاء تربيط. ويأوى جسم الدرع المعدات اللازمة للتنفيذ مثل المكابس الهيدروليكية (Hydraulic rams) ومهمات الطلمبات والتى تستخدم فى دفع الدرع إلى الأمام كلما تم تبطين جزء من النفق. والطول المعتاد لجسم الدرع فى حدود ٢ متر رغم توقف هذا الطول على قطر الحفر. ويمتد ذيل الدرع (Shield tail) خلف جسم الدرع ويستخدم كفراغ يتم فيه إنشاء قطع التبطين (Lining segments) اللازمة لعملية تبطين النفق. وعادة ما يكون عرض الذيل مرة ونصف عرض وحدة التبطين. وتمثل حافة القطع (Cutting edge) الطرف القيادى للدرع ويجب أن تكون هذه الحافة مسلحة تسليحا ثقيلا بألواح الصلب وعادة ما تكون مبطنة بمادة مقاومة للبرى للمساعدة فى قطع التربة القاسية.

١٢-٥-١-٢ الدرع المغلق والدرع النصفى Closed and Half Shield

يستخدم الدرع المغلق فى ظروف التربة شديدة الضعف مثل الطين الرخو (Soft clay) أو الطمى. وفى هذا النوع من التربة يتم تزويد الدرع برأس ضخم من الحديد لغلق مقدمة الدرع وتحتوى هذه الرأس على بوابات تفريغ للسماح بإزالة نواتج الحفر أثناء تنفيذ النفق.

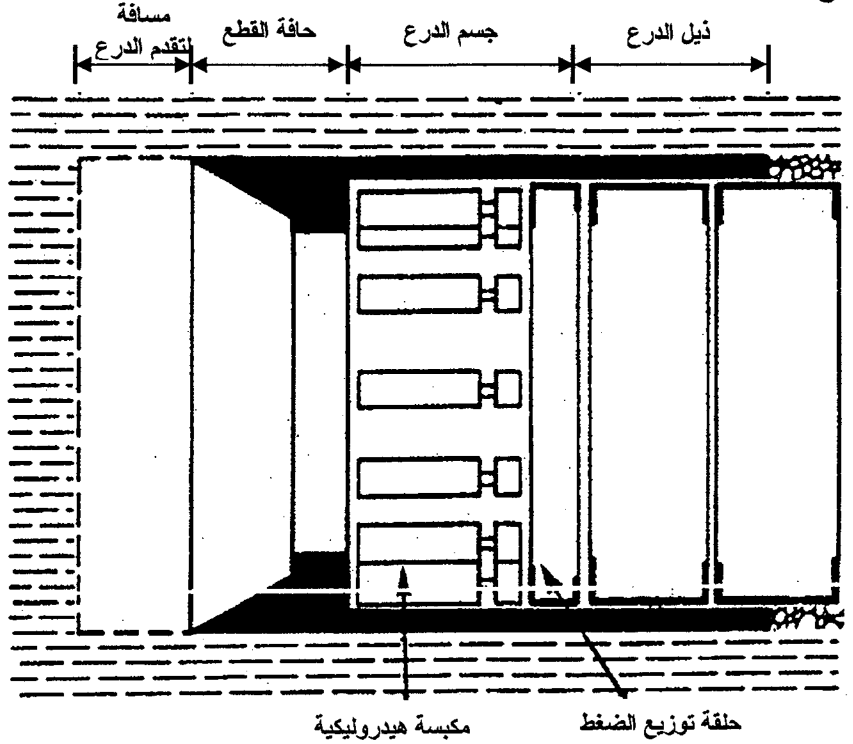
ويمكن البدء فى تنفيذ النفق بأسلوب الدرع (Shield) من خلال حفرة مفتوحة مناسبة محاطة بستارة (Cofferdam) من الخوازيق الحديدية المفلطحة (Steel sheet piles).

١٢-٥-١-٣ الهبوط Settlement المصاحب لتنفيذ الأنفاق بأسلوب الدرع

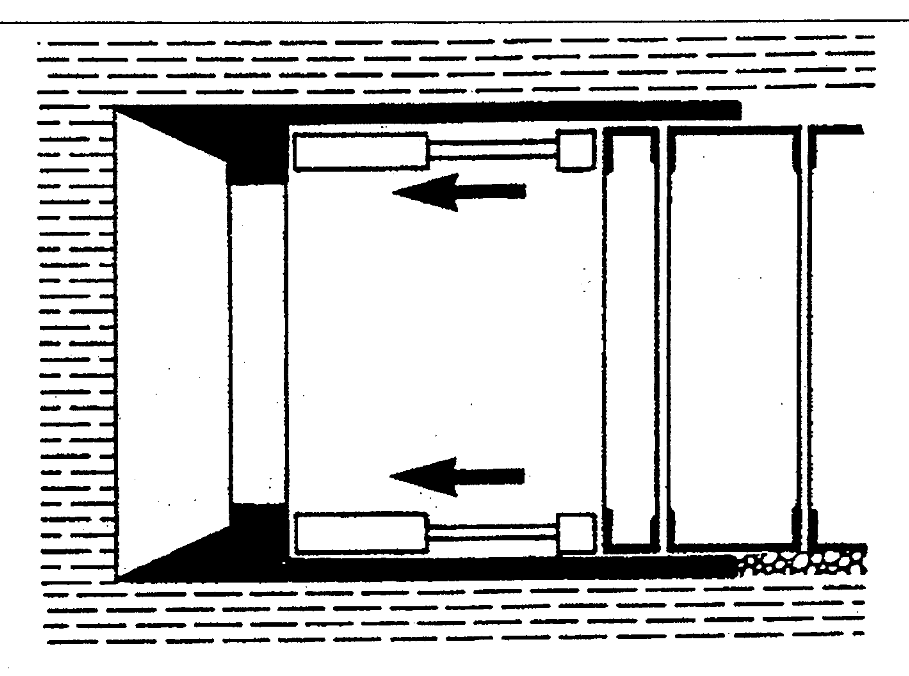
يحدث هذا الهبوط (Settlement) فى التربة المحفورة نتيجة العوامل الآتية :

١- عدم ملء فراغ ذيل الدرع بالكفاءة المناسبة.
٢- فقد التربة عند مقدمة النفق (Tunnel face).
٣- عدم السند الجيد للتربة أو تأخر عملية السند.
٤- تسرب مياه تحت ضغط ينتج عنه انهيارات فى التربة.

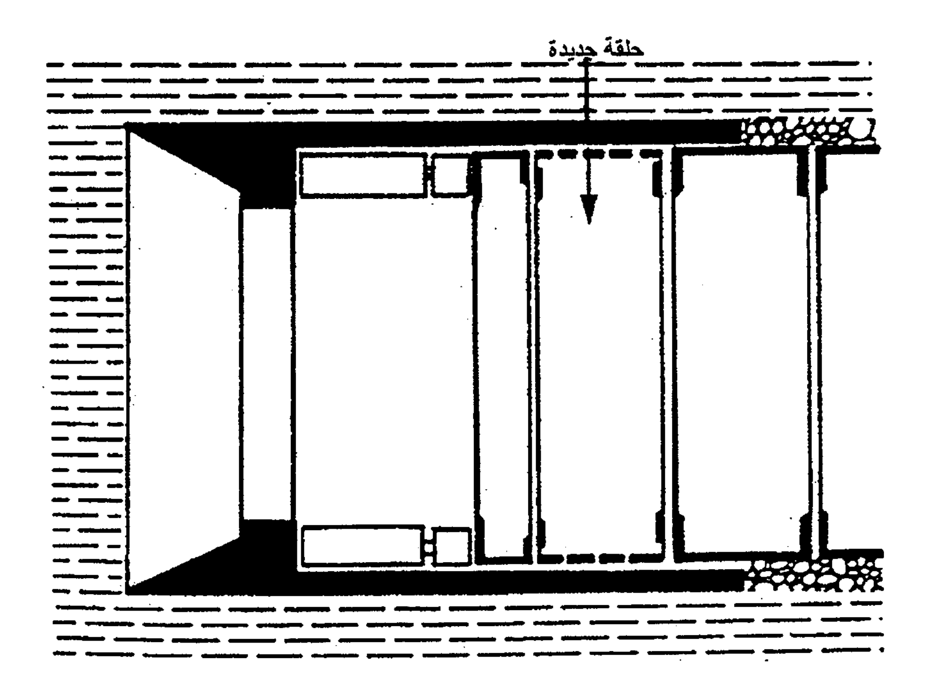
ويعد إستخدام الحقن تحت ضغط (Pressure grouting) مع التبطين الدائم من أكثر الوسائل كفاءة فى تقليل الهبوط الناتج عن حفر النفق.



(أ) حفر التربة تجهيزا لتقدم الدرع



(ب) تقدم الدرع بالضغط على بطانة النفق عن طريق حلقة توزيع الضغط



(ج) إنشاء حلقة جديدة من الركيزة

شكل (١٢-١) الملامح الرئيسية لدرع مفتوح [١٢-٢]

١٢-٥-١-٤ التبطين الإبتدائى Primary Lining للأنفاق المنفذة بطريقة الدرع

يتم الاحتياج لهذا التبطين الإبتدائى لسببين أساسيين (12-35):

١- لسند الحفر (Tunnel support) ومنع تصدع التربة.

٢- للعمل كركيزة (Thrust bearing structure) للدرع لدفع جزء منه إلى الأمام.

والتبطين الإبتدائى الشائع يكون من قطع من الحديد الزهر مع إمكانية إستخدام أعصاب من الحديد (Steel ribs) أو الألواح المعدنية (Steel plates) أو قطع من الخرسانة سابقة الصب.

١٢-٥-١-٥ إستخدام الهواء المضغوط فى الصخر
Compressed Air in Tunneling

ضخ الهواء المضغوط داخل الجزء المحفور حديثا من التربة يؤدى إلى استقرار التربة فى هذا الجزء نتيجة التجفيف لأسطح هذا الحفر والذى يمتد داخليا لعمق صغير داخل التربة. ومن جهة أخرى فإن الأنفاق فى التربة المعرضة لضغط ماء شديد (مثل الأنفاق تحت الأنهار والمجارى المائية) وأيضا الأنفاق فى التربة المسامية (Porous) تحت منسوب المياه لا يمكن تنفيذها إلا بإستخدام الهواء المضغوط حيث يمنع هذا الهواء المضغوط تسرب المياه والتربة إلى داخل فراغ النفق.

١٢-٥-١-٦ مقومات إستخدام أسلوب الدرع فى تنفيذ الأنفاق

أدى إستخدام أسلوب الدرع الواقى فى تنفيذ الأنفاق إلى حدوث تقدم كبير فى مجال تنفيذ الأنفاق فى الأرض الرخوة (Soft ground). وتؤدى الحماية التى يوفرها الدرع للتربة إلى التحكم فى حركة هذه التربة حول سطح الدرع. بالإضافة إلى ذلك يؤدى الهواء المضغوط المستخدم مع هذا الأسلوب إلى منع تدفق المياه إلى داخل الأنفاق المنشأة فى ظروف مياه أرضية متغيرة وخاصة تلك المنشأة تحت منسوب سطح الماء.

وقد ساهم تطور تصميم دروع الوقاية وطرق إستخدامها فى تقليل أو منع سقوط التربة المصاحب لإستخدام أسلوب الدرع فى حفر الأنفاق والناتج عن هبوط (Settlement) التربة المحفورة. ويوفر إستخدام أسلوب درع الوقاية طرقا متعددة لمواجهة مختلف ظروف التربة. وتلعب الاستكشافات المكثفة لطبيعة التربة فى الموقع الذى ينفذ به النفق دورا رئيسيا فى إختيار الطريقة المثلى للتنفيذ والمناسبة لطبيعة هذه التربة. ويحسب للتقدم الكبير الذى حدث فى السنوات القليلة الأخيرة فى أساليب إستخدام درع الوقاية فى تنفيذ الأنفاق مساهمته الفعالة فى حفر الأنفاق فى الظروف شديدة الصعوبة للتربة. والتقدم الكبير فى هذا المجال يتمثل فى استحداث ماكينات تنفيذ أنفاق خاصة بالتربة الرخوة ذات أداء مرض (Satisfactory) وفى التربة عالية المقاومة (High strength) وفى عدد من حالات التربة الصخرية اللينة (Soft rock conditions).

١٢-٥-٢ طرق تنفيذ الأنفاق فى الصخر
Tunneling Methods in Rock Conditions

١٢-٥-٢-١ طريقة الثقب والنسف Drill and Blast Method

يعرف البعض الصخر بأنه الركام (Aggregate) الطبيعى من الحبيبات المعدنية (Mineral particles) الذى يحتاج إلى المتفجرات لحفر الأنفاق به. وبالرغم من أن ماكينات حفر الأنفاق (Tunneling machines) يمكنها الحفر بنجاح فى حالات صخرية قوية عديدة وتعتبر هى الخيار الأول فى مشروعات الأنفاق الهامة إلا أن بعض ظروف الصخر والخاصة بشدة الصخر والتى تتجاوز قدرات ماكينات الحفر تؤدى إلى استبعاد هذه الطريقة فى شق الأنفاق وتظل طريقة الثقب والنسف (Drill and blast) هى الطريقة الوحيدة والعملية التى يمكن إستخدامها فى هذه الظروف. والحد الأدنى للأبعاد العملية للنفق الذى يمكن شقه فى الصخر هو ١,٥ متر عرض و ١,٥ - ٢,٠ متر ارتفاع. ونادرا ما تستخدم ماكينات الحفر فى حفر الأنفاق ذات الأقطار أقل من ٣ أمتار وأيضا تتطلب طريقة الثقب والنسف ألا يقل قطر النفق المراد حفره عن ٣ أمتار. وتعتبر الأنفاق ذات الأقطار من ٥,٠٠ إلى ٥,٥٠ متر هى المثالية من ناحية سهولة وسرعة الحفر فى الصخر. وتتلخص خطوات حفر الأنفاق بطريقة الثقب والنسف فيما يلى :

١- الحفر (Drilling)

ويتوقف عدد ثقوب الحفر (Drill holes) المطلوبـة علـى مقاومـة الصـخر وشكل قطـاع النفق وحجمـه. ويمكن الاسترشاد بالأرقام التالية لتحديد عدد ثقوب المتفجرات المطلوبـة (Blast holes) طبقا لمساحة قطاع النفق مرجع (12-62):

مساحة قطاع النفق (م^2)	عدد ثقوب المتفجرات اللازمة	
	صخور ضعيفة (Soft)	صخور قوية (Strong)
١٠	٢٣ - ٢٧	٣٥ - ٥٠
٢٥	٤٥ - ٥٠	٦٠ - ٧٠
٥٠	٧٥ - ٨٥	٩٥ - ١١٠

وهناك عدد من ثقوب الحفر (Drill holes) تترك خالية من المتفجرات وتستخدم فقط لتخفيف (Relief) الإجهادات الأولية الناتجة عن النسف كما تسمح بحدوث تمدد الصخر والناتج عن النسف. ويمكن أن يصل قطر هذه الثقوب إلى ١٢٥ مم وتكون موازية لخط النفق وقريبة من مركزه.

٢- النسف (Blasting)

تتوقف كميـة المتفجرات المطلوبـة علـى مساحة قطـاع النفق. ويمكن الاسترشـاد بالأرقام التاليـة فـى هذا الصدد مرجع (12-62).

مساحة قطاع النفق (م^2)	كمية المتفجرات اللازمة (كجم / م^3)	
	صخور ضعيفة	صخور قوية
١٠	١ - ٤	٥ - ٧
٢٥	١ - ٢,٥	٤ - ٥
٥٠	١ - ٢	٣ - ٤

وتؤدى ثقوب النسف (Blast holes) الموزعة على محيط قطـاع النفق بتباعد مقداره ٠,٦ م إلـى إحكـام الحصول علـى قطـاع غير معرض لتشوهات متزايدة علـى طـول محيطـه والتـى تتطلب فيما بعد عملية تشذيب وإزالة زوائد. ويصل عمق الثقب الدائرى (Round) إلـى ٢ - ٤ متر ويتـأثر هذا العمق بنـوع الصخر وبحجم النفق حيث يستخدم العمق الكبير (٤ م) فى حالة الأنفاق الكبيرة فى الصـخور القويـة التـى لا تحتاج نظريـا إلـى سند جوانـب الحفر (Support). ويجب دراسـة تـأثير الاهتزازات (Vibrations) الناتجة عن النسف على المنشآت المحيطة بموقع النسف. وهنـاك العديد من الطـرق المتاحـة لتحديد وزن المتفجرات التى لا تؤدى الاهتزازات الناتجة عنها إلى تلف المنشآت المحيطة. ونادرا ما تتجاوز تـرددات (Frequencies) هذه الاهتزازات ١٠ إلى ١٥ هيرتز وتكون سرعة الموجات فى حدود ٣٠٠ متر/ ثانية فى الرمل الجاف و ٣٠٠٠ متر / ثانية فى الجرانيت فـى حين يكون طـول موجـة الاهتزازات فـى حدود ١٠٠ متر.

٣- إزالة حطام النسف (Debris clearance)

يتم إزالة حطام النسف بإستخدام العديد من الطرق والتى يعتمد إختيار واحدة منها على مقاومة الصخر (Strength) وخاصية التآكل له (Abrasive) وحجم النفق الذى يتم حفره. وتشمل هذه الطرق تحميل الحطام على عربات أو على سيور ناقلة أو داخل ماسورة. ولتقليل الوقت الذى يتم فيه إزالة حطام النسف إلى أقل حد ممكن فينبغى أن تكون الوسيلة المستخدمة فى النقل ذات أقصى كفاءة ممكنة. ونظرا لأن شق الأنفاق بطريقة الثقب والنسف تستخدم عادة فى الصخور القوية (Strong) فيجب أن تكون وسيلة إزالة الحطام مناسبة لطبيعة هذه الصخور.

٤- سند التربة (Ground support)

يعتبر إنشاء النظام الساند للتربة هو المرحلة الأخيرة فى عملية حفر النفق. ووظيفة هذا السند هى منع تساقط الصخور والتربة المفككة فى محيط قطاع النفق. ونظم السند المؤقتة تكون عادة مطلوبة فى جميع مشاريع الأنفاق. ويجب أن تكون هذه النظم ذات قوة كافية للتحكم فى حركة الصخور حول محيط الحفر. ويتم تصميم التبطين الأبتدائى لتحمل جميع الأحمال المتعرض لها النفق قبل البدء فى التبطين النهائى له. وتستخدم حاليا أعصاب من الحديد المقوس (Arched steel ribs) لتنفيذ هذه النظم وذلك لقوتها وسهولة تنفيذها. كما تستخدم بنجاح الخرسانة المقذوفة (Shotcrete) بالاشتراك مع شبكة أو شبكتين من الحديد فى الأتجاهين لعمل نظام السند المؤقت وخاصة فى الأنفاق ذات القطاعات الكبيرة.

ويتم عادة وضع التبطين النهائى الدائم (Permanent lining) للنفق بعد الانتهاء من شق النفق بأكمله. غير أن بعض الأنفاق الكبيرة يتم وضع التبطين النهائى الدائم لها مرحليا وعلى أجزاء وذلك بعد نقل حطام النسف خارج جسم النفق لكل جزء ويؤدى ذلك إلى تقليل وقت إنشاء النفق.
هذا ويجب عند تصميم عملية الثقب والنسف فى الصخور لحفر الأنفاق مراعاة عدم حدوث الظاهرتين التاليتين مرجع (12-34) :

أ- فقد الحساسية لشحنة المتفجرات (Desensitization)

ويحدث نتيجة زيادة جرعة المتفجرات عن حد معين حيث يؤدى تفجير المتفجرات فى ثقب ما إلى فقد حساسية جزء من هذا المتفجر فى نفس الثقب ويمكن التغلب على هذا العيب بإستخدام متفجرات حساسة نسبيا وذات سرعات تفجير عالية. كما يمكن أن يحدث فقد للحساسية لشحنة المتفجرات عند تفجير المتفجر فى ثقب ما فيتسبب فى عدم فاعلية المتفجر فى ثقب مجاور ويحدث هذا فى الثقوب المتقاربة والتى لا يزيد التباعد بينها عن ٧٥ - ٢٠٠ مم ولا تحدث هذه الظاهرة إذا ما تباعدت الثقوب لمسافات تزيد عن ٣٠٠مم. ويعتبر هذا الرقم الأخير هو الحد الأدنى الذى يجب أخذه فى الاعتبار عند تصميم عملية الثقب والنسف لحفر الأنفاق.

ب- التفجير التعاطفى (Sympathetic detonation)

ويقصد به ما يحدث عندما تتسبب موجه التفجير للمتفجر فى أحد الثقوب فى تفجير المتفجر فى ثقب أخر مجاور وذلك فى حالة تقارب الثقوب لتكون المسافات بينها أقل من ٧٥ مم وخاصة فى الصخور التى تمتلك خاصية نقل طاقة الهزة (Shock energy) . ولتفادى هذه الظاهرة يجب ألا يقل التباعد بين الثقوب المتجاورة عن ٣٠٠ مم.

وتوجد أربعة أساليب شائعة لقطع الصخر فى عملية حفر الأنفاق بطريقة الثقب والنسف وهى :

١- القطع بالحرق (Burn cut)
ويتضمن هذا الأسلوب ثقب مقدمة النفق (Tunnel face) بمجموعة ثقوب متوازية ومتقاربة لعمل تجويف مركزى كما يتضح من الشكل (١٢-٢) ويستخدم هذا الأسلوب عادة للأنفاق حتى قطر ٥,٥٠ متر. ويجب حفر عدة ثقوب تنفيس (Relief holes) أعمق من ثقوب المتفجر بحوالى من ١٥٠ - ٣٠٠مم.

٢- القطع بالخوابير (Wedge cut)
ويعتمد هذا الأسلوب على استخراج خوابير (Wedge) من الصخر من مقدمة النفق (Tunnel face) خلال التفجير الأولى ثم يلى ذلك توسيع أماكن هذه الخوابير بواسطة التفجيرات المتأخرة (Delayed blasts) . وعادة ما يستخدم نظام متماثل من الخوابير. ويعد هذا الأسلوب ملائما للأنفاق ذات القطاعات الكبيرة فى الصخور الكثيفة والصخور الصلدة ويوضح الشكل (١٢-٣) أسلوب القطع بالخوابير.

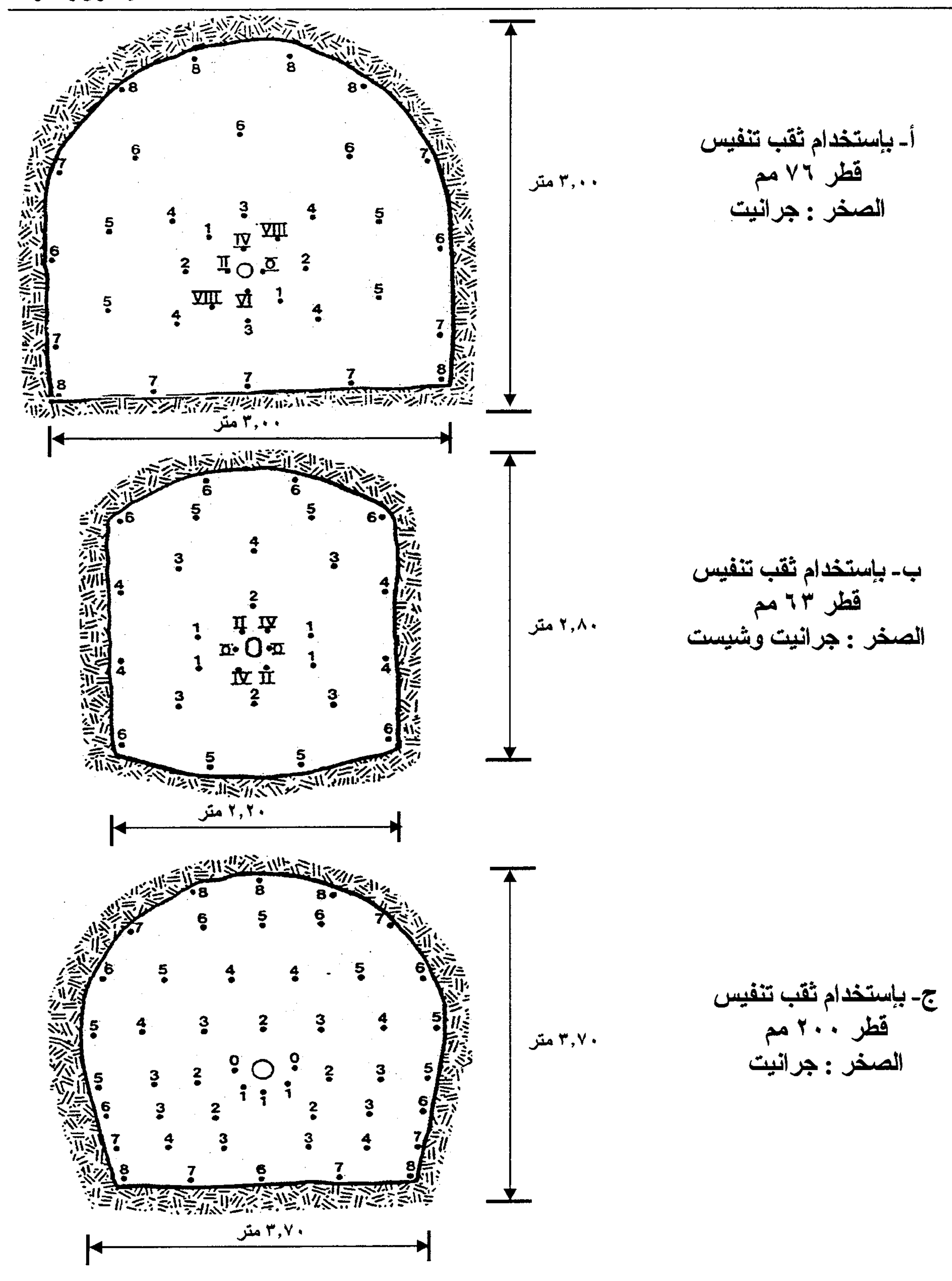
٣- القطع بأسلوب المروحة (Fan cut)
وهذا الأسلوب محدود الإستخدام نظرا لصعوبة عمل الثقوب بالهيئة المطلوبة. ويوضح الشكل (١٢-٣) هذا الأسلوب.

٤- القطع الخطافى (Drag cut)
عادة ما يستخدم هذا الأسلوب فى الأنفاق الصغيرة جدا مثل أنفاق الصرف الصحى. ويمثل هذا الأسلوب أقصى كفاءة للحفر بواسطة المتفجرات نظرا لإستخدام عدد محدود من الثقوب فى قطاع النفق والذى عادة ما يكون مستطيل الشكل. والشكل (١٢-٤) يوضح هذا الأسلوب فى القطع.

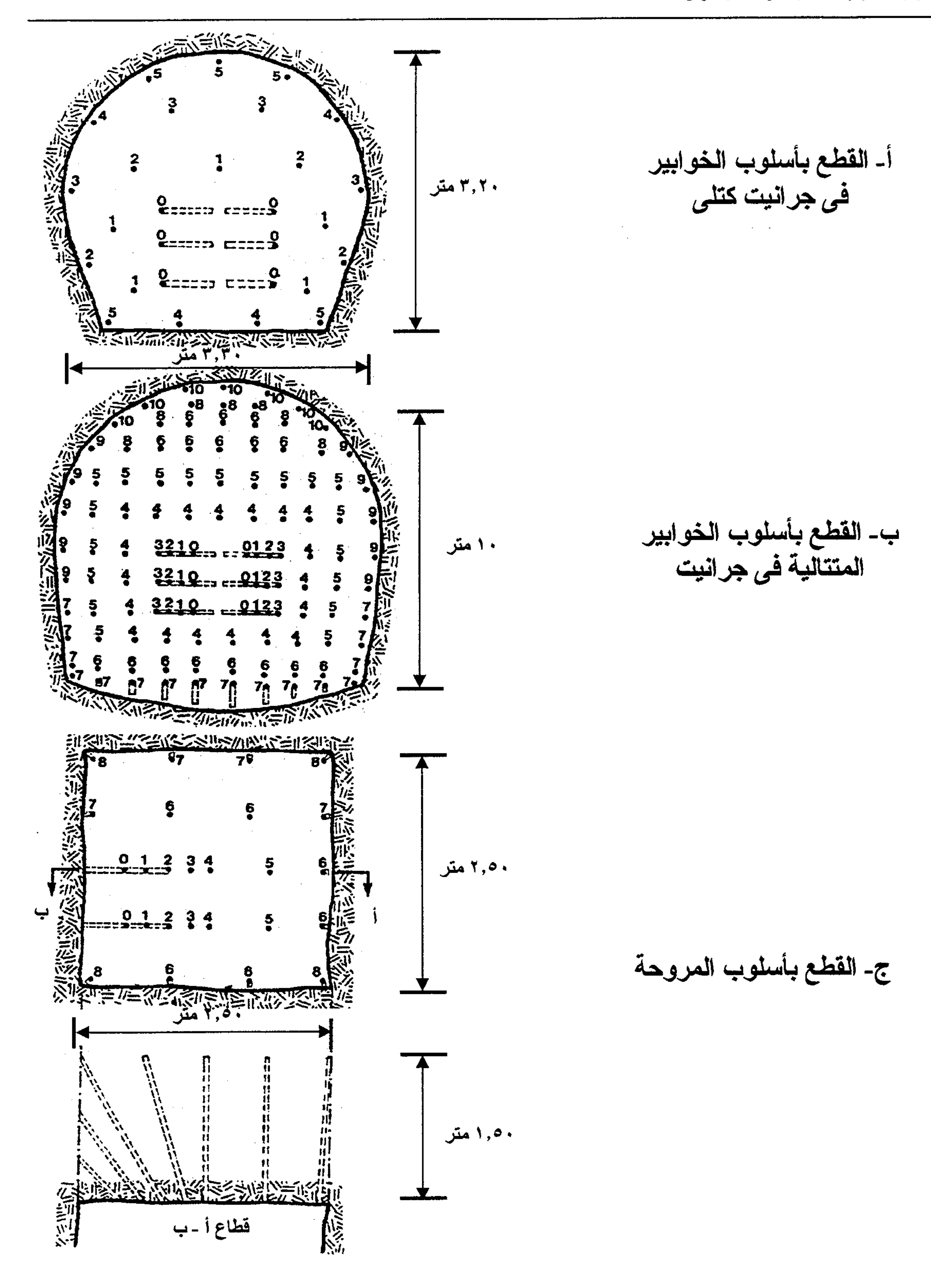
وتوجد عدة أساليب أخرى للقطع بالنسف (Blasting cut) تعتمد على الظروف الجيولوجية وطبيعة النفق وهى موضحه بالشكل (١٢-٤).

ويؤثر حجم الثقب على قابلية الصخر للثقب (Drillability) وخاصة عندما يقابل الثقب صخورا مشروخة أو صخورا مكسورة. ويوضح الشكل (١٢-٥) كيفية تأثير قطر الثقب على كفاءة قابلية الصخر للثقب.

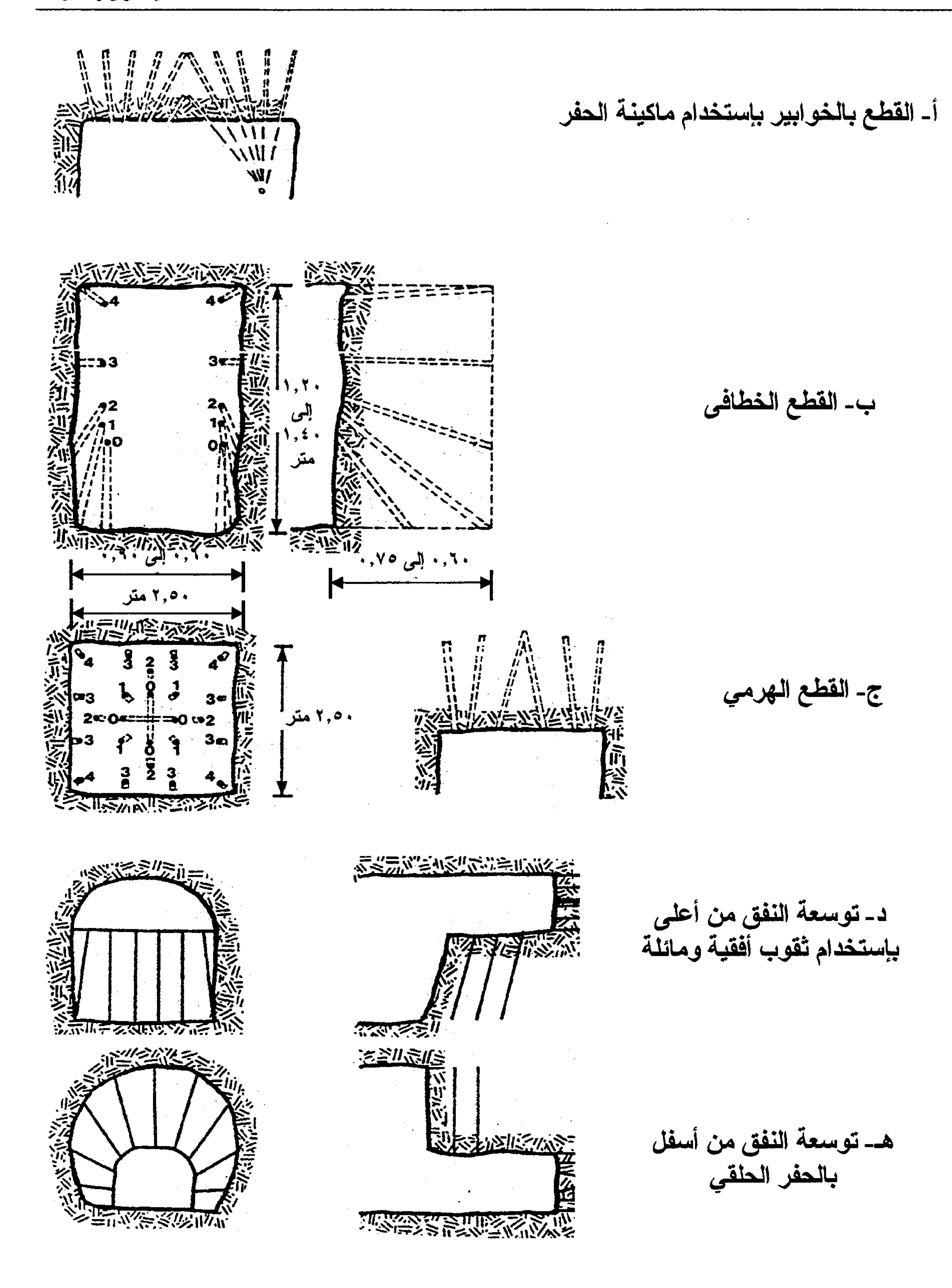
وعموما فإن التقدم الكبير فى حفر الأنفاق يدين بالكثير إلى الإنجازات التى تمت فى طريقة الثقب والنسف (Drill and blast excavation) بحيث تؤدى مزايا هذه الطريقة والتطورات الحديثة بها إلى توفير مستويات أمان عالية مع زيادة فاعلية التفجير مما يحفز على إستخدام هذه الطريقة بكثرة وخاصة فى الصخور شديدة الصلابة (Very hard rock).



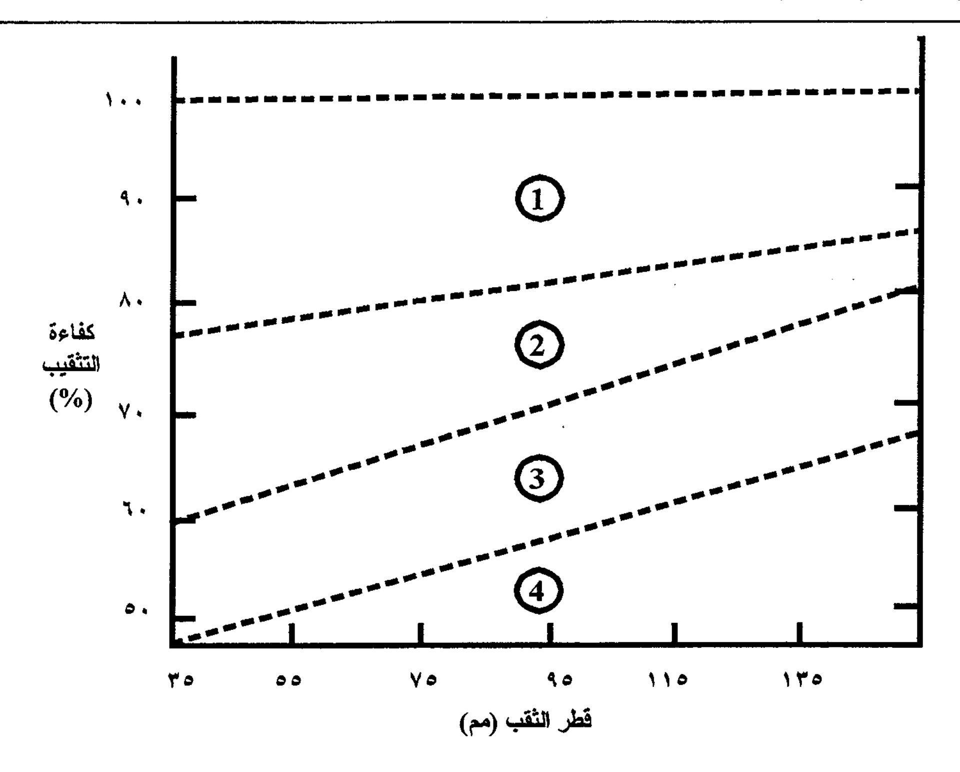
شكل (١٢-٢) نماذج لقطع الصخر لحفر الأنفاق بإستخدام أسلوب القطع بالحرق مع بيان أماكن مناسبة لثقوب التنفيس [١٢-٢]



شكل (١٢-٣) نماذج لقطع الصخر لحفر الأنفاق بإستخدام أسلوب القطع بالخوابير [١٢-٢]



شكل (١٢-٤) أمثلة أخرى لنظم وتكنولوجيا قطع الصخر [١٢-٢]



١- صخر متجانس غير مكسور بدون شروخ
٢- صخر غير مكسور تقريبا مع بعض الشروخ
٣- صخر بسيط التكسر به شروخ
٤- صخر متكسر بشروخ كثيرة

شكل (١٢-٥) تأثير قطر الثقب على كفاءة التثقيب فى الصخور المتكسرة [١٢- ٧]

١٢-٥-٢-٢ طريقة ماكينة الحفر Road Header Machine Excavation

توفر ماكينة قطع الصخر المسماة Road header تنوعا ومرونة عاليتين لقطع الصخور بغرض شق الأنفاق فى التكوينات الجيولوجية. ويتراوح وزن هذه الماكينة بين ٢٥ طن أو أقل للماكينات الخفيفة و٩٠ طن أو أكثر للماكينات الثقيلة (Heavy duty) وتصل قدرة موتور هذه الماكينة إلى أكثر من ٢٢٥ كيلووات لتولد عزما (Torque) يتعدى ٣٢٠ كيلو نيوتن - متر.

ويكون قطع الصخر بواسطة ماكينة Road header من خلال أحد نظامين : الشق (Ripping) أو التفريز (Milling). ويوضح الشكل (١٢-٦) هذين النظامين.

ويستخدم نظام الشق (Ripping) بكثرة فى قطع الصخور الضعيفة نسبيا مثل الفحم الحجرى والصخور الرسوبية حيث يعطى هذا النظام معدل أداء أفضل بالمقارنة مع نظام التفريز (Milling) . ويقل وزن ماكينات (Road header) العاملة بنظام الشق (Ripping) عن مثيلاتها العاملة بنظام التفريز (Milling) بنحو ٢٠ - ٣٠ % . ومن أهم خصائص ماكينات (Road header) العاملة بنظام الشق تكيفها مع الظروف الصعبة للتربة وسهولة مناورتها (Maneuverability) وقابليتها لقطع قطاعات كبيرة وقدرتها الكبيرة على القطع والتى تجعل منها وسيلة جذابة للحصول على كمية عمل كبيرة كما فى حالة أنفاق المناجم.

والشكل الشائع للرأس القاطع فى ماكينات (Road header) العاملة بنظام التفريز (Milling) هو المخروط الذى يلف حول محور ذراع القاطع (Cutter boom axis) . وتستخدم هذه الماكينات بكثرة

فى القطع فى الظروف الجيولوجية القوية والصعبة ، وفى مثل هذه الأحوال فإنها تؤدى إلى توفير الوقت مقارنة بماكينات (Road header) العاملة بنظام الشق (Ripping).
ويؤدى إستخدام تيار من الماء الدافق (Water jet) تحت ضغط يصل إلى ٧٠٠ بار (700 bar) إلى تخفيض كبير فى القوى المطلوبة من معول القطع (Pick cutting) لماكينة القطع (Road header).
ويوضح الشكل (١٢-٧) كيفية إستخدام تيار الماء الدافق مع معول القطع فى ماكينات (Road header)

ومن المهم تقدير فاعلية أداء ماكينات الحفر (Road header) فى الأنواع المختلفة للصخور. وفى هذا الصدد فقد أنصب الاهتمام على إنشاء دليل لخصائص الصخر (Rock index properties) مع عمل ارتباط بين هذا الدليل وبين تقدم معدلات أداء ماكينات (Road header) . ومن المعادلات المعروفة فى هذا الشأن معادلة إيفان (Evans equation) والتى يمكن عن طريقها تقدير قوة معول القطع (Pick cutting force) مرجع (12-23)

$$Fc = \frac{2\,t\,w\,d \sin 0.5\,(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{1 - \sin 0.5\,(\frac{\pi}{2} - \alpha)} \qquad (12\text{-}1)$$

حيث
Fc = القوة المؤثرة على الدسرة (Wedge) فى اتجاه القطع لخطة الانهيار (Failure)
t = مقاومة الشد للصخر
w = عرض الدسرة (Wedge)
d = عمق القطع (Depth of cut)
α = زاوية ميل الدسرة (Wedge rake angle)

وقد أثبتت التجارب ملاءمة النتائج النظرية لهذه المعادلة مع النتائج التجريبية. ويوضح الشكل (١٢-٨) العلاقة بين تغيير زاوية ميل معول القطع (Pick rake angle) وبين قوة القطع. ويتضح من هذا الشكل أن قوة القطع Fc تزيد بشدة عندما تقل زاوية الميل α عن ٣٠°.

كما أن هناك علاقة بين الطاقة النوعية (Specific energy) وقوة قطع الصخر تمثلها المعادلة التالية مرجع (12-15) :

$$\text{Specific energy (SE)} = F'c \,/\, (wd + d^2 \tan\theta) \qquad (12\text{-}2)$$

حيث
$F'c$ = قوة القطع المتوسطة
θ = زاوية الكسر (Breakout angle)

وحيث أن Fc يمكن اعتبارها القيمة المتوسطة لقوى القطع العظمى (Mean peak force) فقد لوحظ أن النسبة (R) بين القيمة المتوسطة لقوى القطع العظمى (Fc) وقوة القطع المتوسطة (F'c) هى نسبة ثابتة ونادرا ما تكون أقل من ٢ .

$$F'c = \frac{Fc}{R} \qquad (12\text{-}3)$$

ومن ثم واستنادا إلى المعادلات السابقة فإنه يمكن استنباط المعادلة التالية :

$$SE = k_1 \,/\, (k_2 + d) \qquad (12\text{-}4)$$

حيث

$$k_1 = \frac{2\,t\,w \sin 0.5\,(\frac{\pi}{2} - \alpha)}{R \tan\theta\,\{1 - \sin 0.5\,(\frac{\pi}{2} - \alpha)\}} \qquad (12\text{-}4a)$$

$$k_2 = w / \tan\theta \qquad (12\text{-}4b)$$

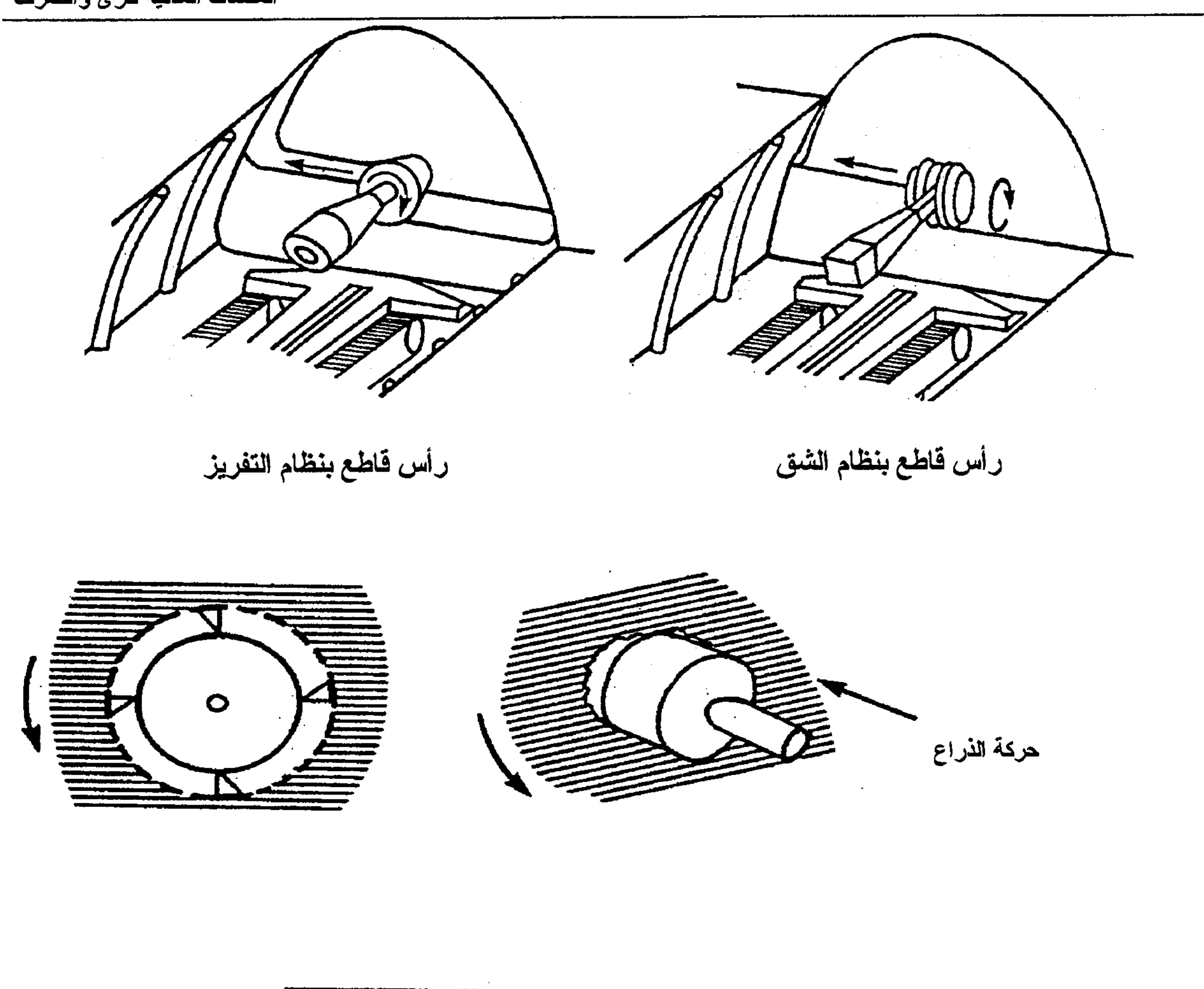
وقد ساهمت تطبيقات الحاسب الآلى على الرأس القاطع (Cutting head) لماكينة (Road header) من خلال برنامج CAD (Computer Aided Design) فى تحسين شكل القطع للصخور وتحسين معدل الأداء وحسن توزيع الأحمال بين المعاول المختلفة لماكينات Road header المستخدمة مع تخفيض الاهتزازات الناتجة عن عملية القطع.

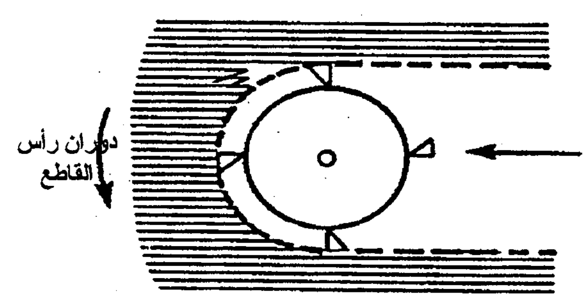
ويوجد الآن أسلوب جديد لحفر الأنفاق بإستخدام مطارق صدم هيدروليكية (Hydraulic impact hammers) وقد استخدم هذا الأسلوب فى إنشاء عدد من الأنفاق فى أوروبا (إيطاليا). ومنذ ظهور هذا الأسلوب فى الستينات وهو يجد إقبالا وإنتشارا كوسيلة تكسير للطرق وللخرسانة وأخيرا كوسيلة حفر وتكسير الصخور فى المناجم والمحاجر. ويتم حمل مطرقة الصدم على قاعدة متحركة على قضبان. وتتمثل المزايا الرئيسية لهذا الأسلوب فى حفر الأنفاق فيما يلى :

١- يلغى هذا الأسلوب الحاجة إلى الثقب والنسف فى مقدمة النفق (Tunnel face) .
٢- يتم نقل نواتج التكسير فورا إلى الخارج مع تقدم الحفر مما يوفر مساحة كبيرة لقطاع النفق.
٣- يمكن تفتيت نواتج التكسير ذات الأحجام الكبيرة إلى أحجام أصغر بإستخدام نفس مطرقة الصدم مما يسهل نقلها إلى خارج النفق بكل وسائل النقل وخاصة السيور الناقلة (Conveyors).
٤- يمكن حفر كامل قطاع وجه النفق (Tunnel face) بواسطة هذا الأسلوب فى حالات عديدة من التركيبات الجيولوجية وحيث تتعدى مساحة قطاع النفق ٣٠ متر مربع.
٥- يتم حفر محيط النفق بأقل قدر ممكن من التشوهات لهذا المحيط (Over break) .

وفى هذا الأسلوب يتم بدء الحفر عند مركز مقدمة النفق على بعد ١ إلى ١,٥ متر فوق منسوب أرضية النفق ويكون الحفر لعمق من ١,٥ إلى ٢ متر ثم يستمر الحفر فى اتجاه جوانب وأرضية النفق لتكوين فتحة تستخدم لتكسير الصخور أعلاها لتشكيل سطح النفق وحتى الحصول على كامل قطاع النفق.

ويناسب هذا الأسلوب فى حفر الأنفاق الكتل ذات الشقوق وذات الطبقات الواضحة (Fissured and well defined layered strata) . وتمثل الكتل الصخرية الكثيفة إعاقة لمعدل الحفر بهذا الأسلوب مما يترتب عليه عدم اقتصادية إستخدامه بينما يعتبر هذا الأسلوب ناجحا فى الصخور القوية ضعيفة الربط بين الطبقات والوصلات.

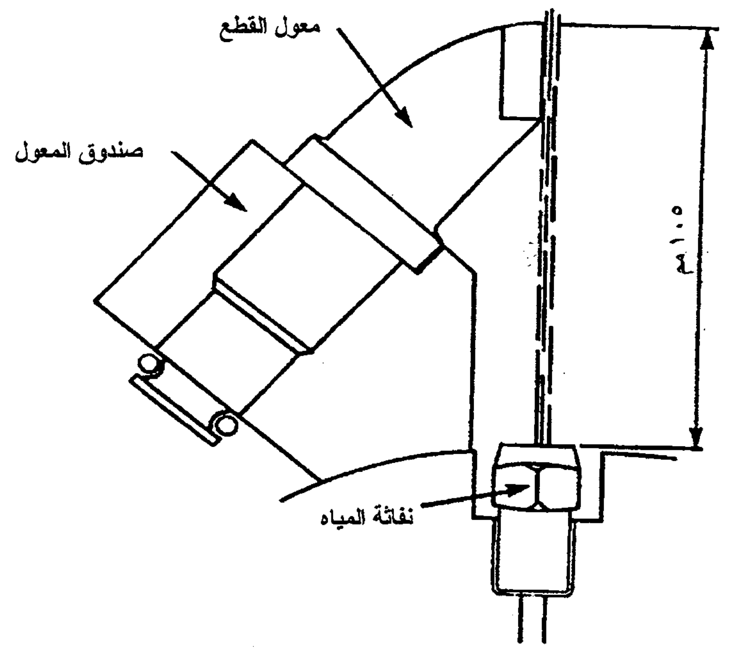




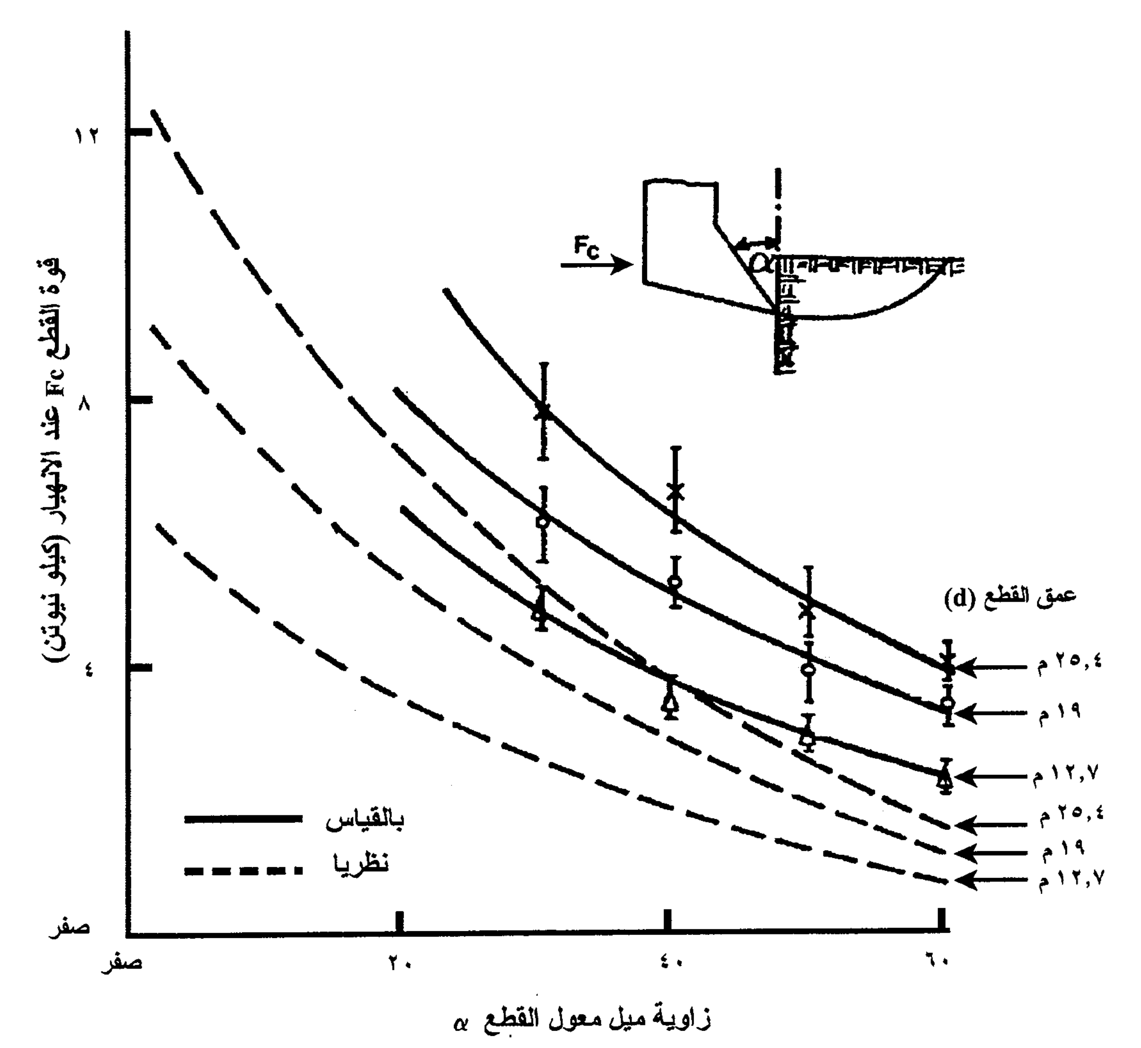


نظم الحفر المستخدمة بواسطة ماكينة الحفر بنظام التفريز

شكل (١٢-٦) نظم القطع بماكينة الحفر[١٢-٢٥] ، [١٢-٣١]



شكل (١٢-٧) وضع نفاثة المياه بالنسبة لمعول القطع [١٢-١٠]



شكل (١٢-٨) تغير قوة القطع مع زاوية ميل معول القطع [١٢-١٢]

١٢-٥-٢-٣ طريقة مخرطة التجويف Tunnel Boring Machine

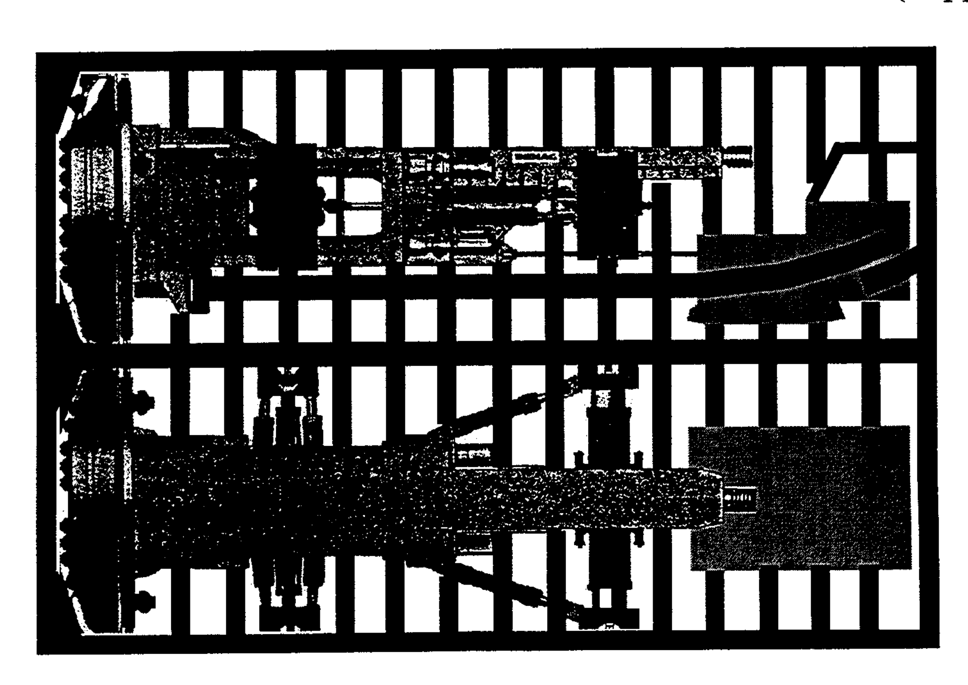
يوضح الشكل (١٢-٩) التصميم الأساسى لمخرطة التجويف (Tunnel boring machine TBM) وتتمثل العملية الرئيسية فى إستخدام هذه المخرطة فى حفر الأنفاق فى وضع الرأس القاطعة والمزودة بالقواطع المناسبة فى مواجهة مقدمة النفق ثم تدور هذه الرأس عادة بسرعة ثابتة لتتدفع داخل مقدمة النفق بواسطة نظام دفع هيدروليكى. ويوضح الشكل (١٢-١٠) خطوات تقدم مخرطة التجويف (TBM) داخل مقدمة النفق فى الكتلة الصخرية. ويتم إزالة ناتج التكسير من مقدمة النفق وذلك بواسطة مجموعة من دلاء التصريف (Disposal buckets) ذات الحركة الدائرية المتحدة مع الرأس القاطع والتى تصرف ما فيها إلى نظام ناقل (Conveyor system).

وتضم الرأس القاطعة لمخرطة التجويف (TBM) مجموعة من القواطع (Cutters) وتعتمد نوعية هذه القواطع على طبيعية وظروف التربة المتوقع مقابلتها أثناء الحفر. فبينما يستخدم القاطع الخطافى (Drag cutter) فى التربة الرخوة (Soft ground) فإنه يتلف سريعا فى الصخر ويستخدم بدلا منه رأس قاطعة (Cutting head) دوارة فى مواجهة مقدمة النفق وهذه الرأس عبارة عن قرص (Disc) مزود بحافة قاطعة يمكن استبدالها. وفى بعض التصميمات فإن القرص يحتوى على حافتين أو ثلاثة. ويعتمد أسلوب الحفر بواسطة هذا القرص على إحداث مجرى (Groove) فى الصخر مع التأثير بقوة قص (Shearing face) لكسر ما تبقى من حواف الصخر (Ridges). ويوضح الشكل (١٢-١١) ملامح إضافية لتصميم وعمل مخرطة التجويف (TBM).

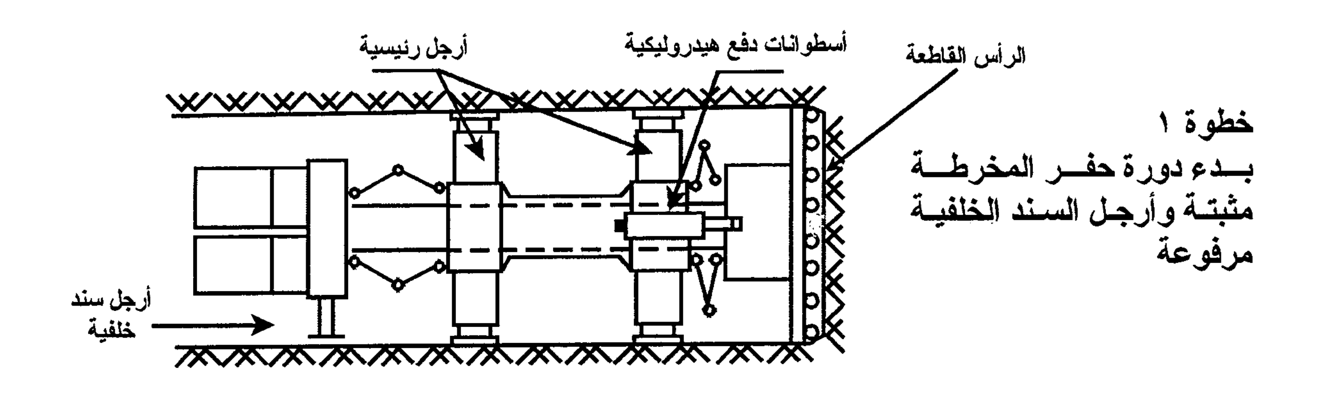
وتعتبر الأنفاق ذات الأقطار من ٥ إلى ١٠ متر مفضلة لإستخدام مخرطة التجويف (TBM) وذلك للسببين التاليين :

١- سهولة دخول نظام مخرطة التجويف (TBM) بالرأس القاطعة والقواطع والعناصر الإنشائية الأخرى والعاملين بالنفق مما يوفر العناية الفعالة بالخدمة والصيانة.

٢- سهولة واستمرارية وكفاءة أعمال نقل مخلفات التكسير. وتمثل الأنفاق ذات الأقطار الصغيرة صعوبات لأداء نظام مخرطة التجويف (TBM) تتمثل فى بطئ نقل نواتج التكسير وضعف التهوية (Ventilation) داخل النفق وعدم وجود فراغ كافى حول المخرطة للقيام بأعمال سند النفق (Support).

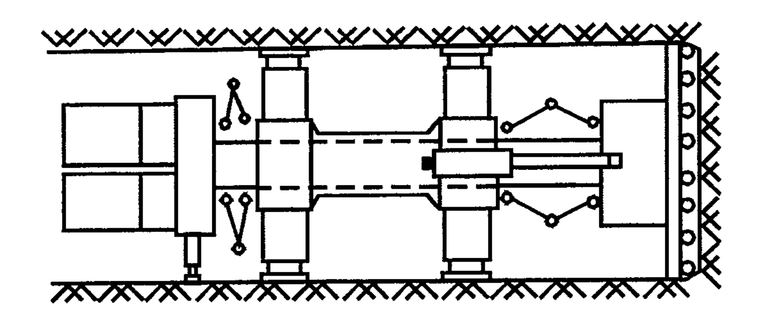


شكل (١٢-٩) التصميم الأساسى لمخرطة التجويف TBM [١٢-١]

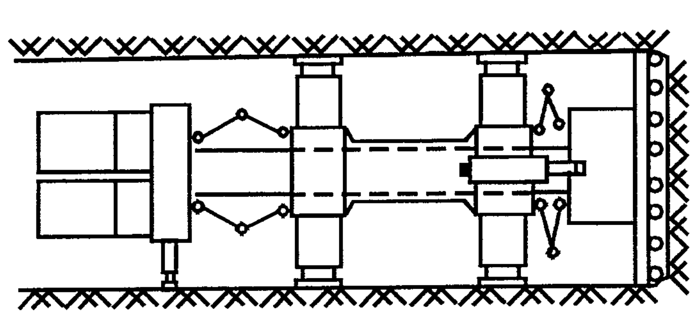


خطوة ١
بـدء دورة حفـر المخرطـة مثبتـة وأرجل السـند الخلفيـة مرفوعة

خطوة ٢
نهايـة دورة حفر المخرطة مثبتـة ، الـرأس اسـتطالت وأرجـل السـند الخلفيـة مرفوعة



خطوة ٣
بـدء دورة إعـادة الوضـع المخرطـة سـائبة ، وأرجـل السند الخلفية استطالت



خطوة ٤
نهايـة دورة إعـادة الوضـع. المخرطـة سـائبة ، الـرأس مرفوعـة. المخرطـة معـدة للتثبيـت وبـدء دورة حفـر جديدة

شكل (١٢-١٠) طريقة تقدم مخرطة تجويف الصخر [١٢-١٣]

وأهم المؤثرات على أداء مخرطة التجويف (TBM) تتمثل فى :
١- التربة : التكوين الجيولوجى ، خصائص الصخر ، المياه الأرضية (Ground water) .
٢- تصميم النفق : القطر ، الطول.
٣- الممارسة بالموقع : تنظيم العمل ، عدد ساعات العمل.
٤- سياسات الإدارة : العمل ، إستخدام المخرطة ، خطط الصيانة ، النظم البديلة (Backup system).
٥- قدرات الماكينة : الدفع ، القدرة ، العزم ، قطر القرص الدوار ، إنشاء نظام السند (Support).

وتتوقف معدلات الأداء على قطر النفق ويمكن الاسترشاد بالمعدلات التالية مرجع (12-45) :

قطر النفق (متر)	معدل الأداء الأفضل (متر / ساعة)
٢	١,٠٠
٤	١,٩٠
٥,٥٠	١,٥٥
٨,٥٠	١,٠٠
٩	٠,٩٥
١١,٥٠	٠,٧٠

ويمكن توصيف أداء القرص القاطع (Disc cutter) لمخرطة التجويف بالعناصر التالية والموضحة بالشكل (١٢-١٢).

١- قوة الدفع (Thrust force F_T) : وهى عبارة عن متوسط القوة المؤثرة عموديا على اتجاه دوران القرص واللازمة لبقاء القرص عند عمق التوغل المطلوب. ويمكن حسابها من المعادلة التالية :

$$F_T = 4\,\sigma \tan 0.5\,\phi \sqrt{(DP^3 - P^4)} \qquad (12\text{-}5)$$

حيث
σ = أجهاد الضغط أحادى المحور للصخر (Uniaxial)
ϕ = زاوية حافة القرص
D = قطر القرص
P = عمق توغل القرص فى الصخر (Penetration)

وتعتمد المعادلة السابقة على إفتراض أن مقاومة توغل القرص فى الصخر تتوقف على قوة الصخر ، كما يفترض فى هذا التحليل أن قوة الدفع (F_T) تبقى ثابتة عند دوران القرص.

٢- قوة التدحرج (Rolling force F_R) : وهى متوسط القوة المؤثرة فى اتجاه القطع وهى القوة اللازمة لدحرجة القرص إلى عمق التوغل المطلوب. ويمكن حساب قوة التدحرج F_R من المعادلة التالية بالرجوع إلى الشكل (١٢-١٢) :

$$F_R = 4\,\sigma\,P^2 \tan 0.5\,\phi \qquad (12\text{-}6)$$

٣- الحصيلة (Yield Q) : وهى حجم الصخر الذى تم حفرة بواسطة القرص القاطع ويعبر عنه بالمسافة المقطوعة من الصخر.

٤- الطاقة النوعية (Specific energy SE) : وهى الشغل المبذول فى قطع وحدة الحجوم من الصخر بواسطة القرص القاطع.

وقد وجد من مقارنة نتائج التحليل النظرى بالنتائج المعملية لأداء القرص القاطع التأثيرات التالية :

أ- زيادة قطر القرص القاطع تؤدى إلى زيادة قوة الدفع (F_T) ولكن دون أى تغيير محسوس فى قيمة قوة التدحرج (F_R) أو قيمة الحصيلة (Q) أو الطاقة النوعية (SE).

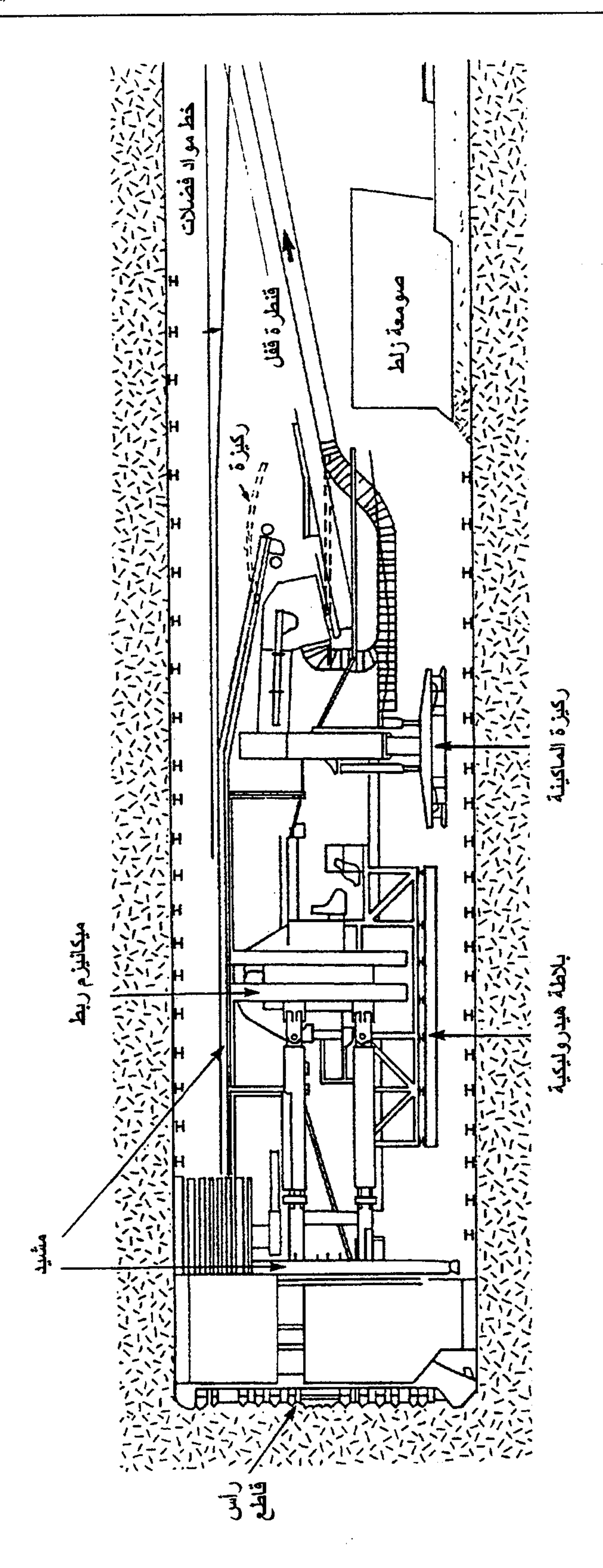
ب- زيادة عمق التوغل (P) للقرص تؤدى إلى زيادة كل من قوة الدفع (F_T) وقوة التدحرج (F_R) زيادة ملموسة. ويؤدى ذلك بالتالى إلى زيادة الحصيلة (Q) وهبوط الطاقة النوعية (SE).

ج- زيادة زاوية حافة القرص (ϕ) تؤدى إلى زيادة مماثلة فى قوة الدفع (F_T) وإلى زيادة هامشية فى قوة التدحرج (F_R) وتتأثر الطاقة النوعية (SE) بعمق التوغل بينما لا تتأثر الحصيلة (Q) .

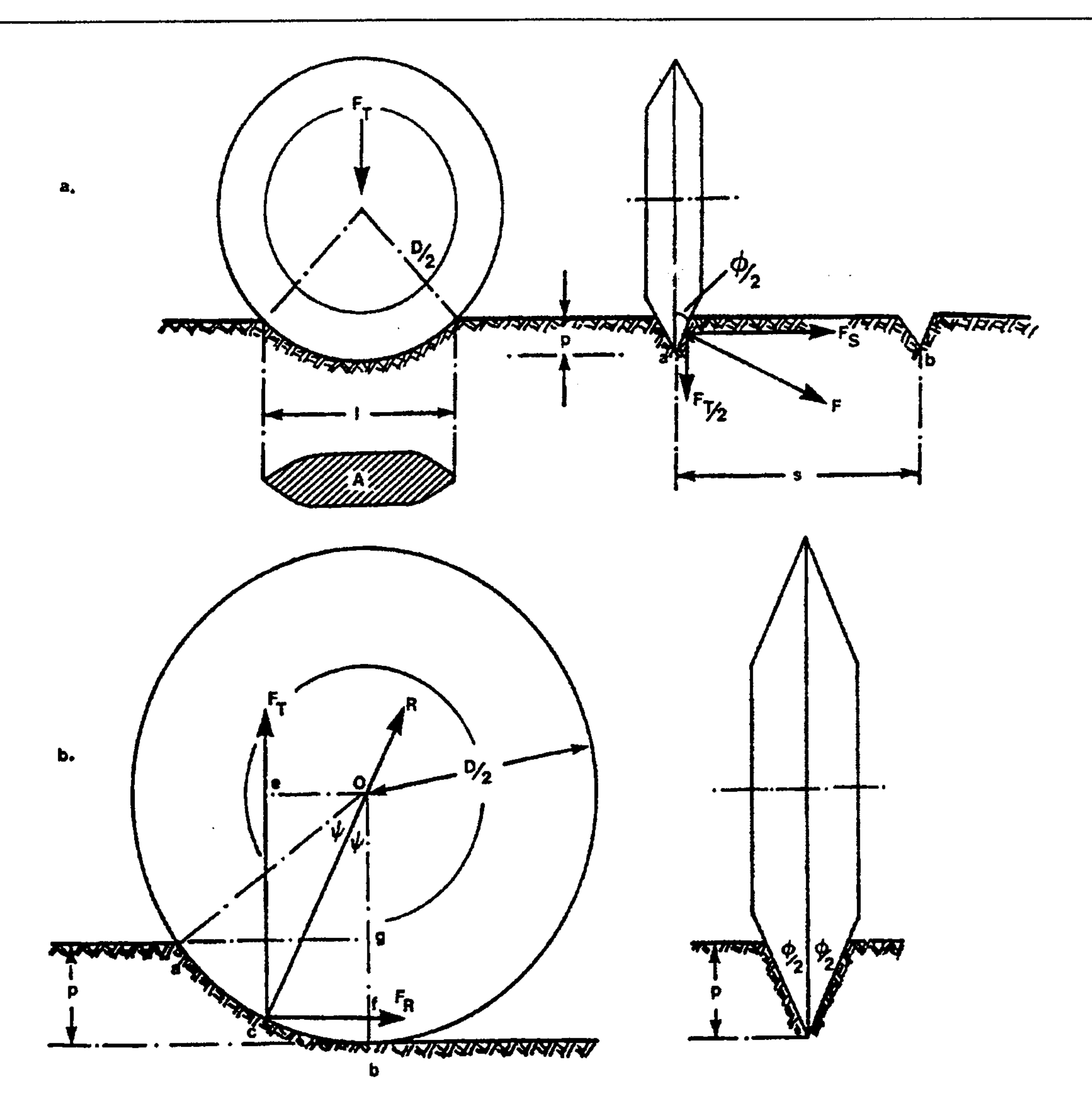
د- زيادة سرعة دوران القرص حتى ٢٠٠ مم / ثانية لا تؤدى إلى تغيير محسوس فى قوتى الدفع (F_T) والتدحرج (F_R) أو فى الطاقة النوعية (SE) أو الحصيلة (Q) .

هـ- التباعد بين قواطع القرص (S) (Disc cuts) يلعب دورا هاما فى حدوث التداخل بين زوايا التكسير (Breakout angles) والذى يؤدى بدوره إلى زيادة كفاءة الحفر. وتعد نسبة التباعد إلى عمق التوغل $\frac{S}{P} \cong$ ٧,٠ مقابلة لأقصى تداخل بين زوايا الكسر.

ويستخدم الماء المتدفق (Water jet) لتحسين أداء القرص القاطع وذلك لتنظيف مسار القرص بإزالة مخلفات القطع ولإطالة عمر المخرطة نظرا لتأثير التبريد وأيضا لتقليل القوى المبذولة من المخرطة (TMB) . ويوضح الشكل (١٢-١٣) آلية الكسر فى الصخر والناتج عن القرص القاطع.



شكل (١٢-١١) السند بعقد حلقي وراء الرأس القاطع [١٢-٢٢]



شكل (١٢-١٢) توغل القرص والقوى المصاحبة [١٢-٥٠]

١٢-٦ تأثير الظروف المعاكسة للصخر على حفر الأنفاق

Adverse Ground Conditions

تتلخص أهم الظروف المعاكسة التى تتواجد فى الصخر والتى تؤثر بشكل فعال على عملية حفر الأنفاق وتؤدى إلى تقليل معدلات الأداء وإلى توقف عملية الحفر أحيانا فيما يلى :

١- مناطق ذات فوالق ثانوية كثيفة (Extensive minor faulting).

٢- مناطق تصدع عريض (Wide fault) تحتوى على مقعر (Gauge) مملوء بالصخور (Boulders).

٣- مناطق ضعيفة ذات تصدع كامن (Collapse potential).

٤- مناطق متفرقة تحتوى على وصلات ضعيفة وطبقات أرضية شديدة الميل للتآكل (Heavily weathered bedding planes) وسريان مياه داخلى رئيسى (Major water inflows) وتؤدى هذه الظروف المعاكسة للصخر إلى حدوث بعض المشاكل مثل:

أ- سقوط للصخور خارج النفق وتكومها عند مدخله.

ب- انهيار صخرى بجوار مقبض رافعة الدفع (Thrust jack gripper).

ج- زيادة معدل استهلاك القاطع فى مخارط (TBM).

د- الحاجة إلى عمل ثقب استكشافى (Probehole) لمعرفة وجود المياه الأرضية والفوالق.

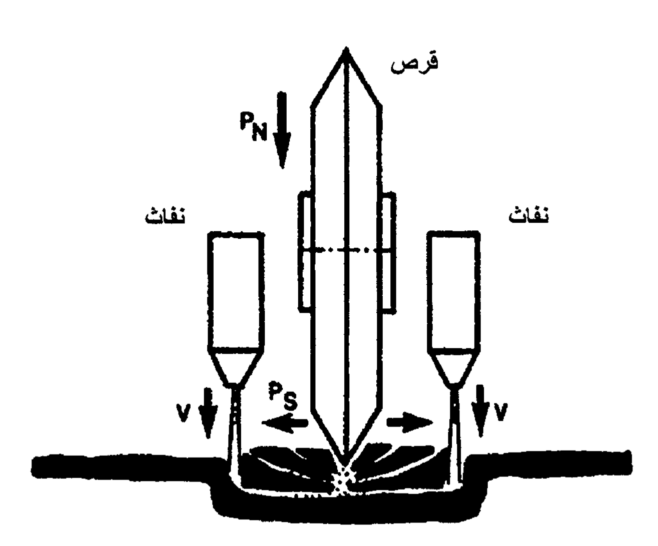
ويمكن أن تؤثر هذه المشاكل بعمق على معدل أداء مخارط التفريز (TBM) والذى يمكن أن يصل فى حالة الظروف المثالية للصخر إلى أكثر من ٣ متر / ساعة أو ٥٠ متر / يوم.

وبينما تؤثر الصلابة الشديدة للصخر ومقاومته العالية للبرى تأثير هامشيا على إستخدام طريقة الثقب والنسف (Drill and blast) فى حفر الأنفاق فإنها تؤثر تأثيرا شديدا على إستخدام طريقة مخرطة التفريز (TBM) حيث يتمثل هذا التأثير فى ضعف معدلات التوغل (Penetration) ، الوقت الضائع فى التغيير المتلاحق للقاطع (Cutter) وأيضا التكلفة العالية لهذه القواطع.

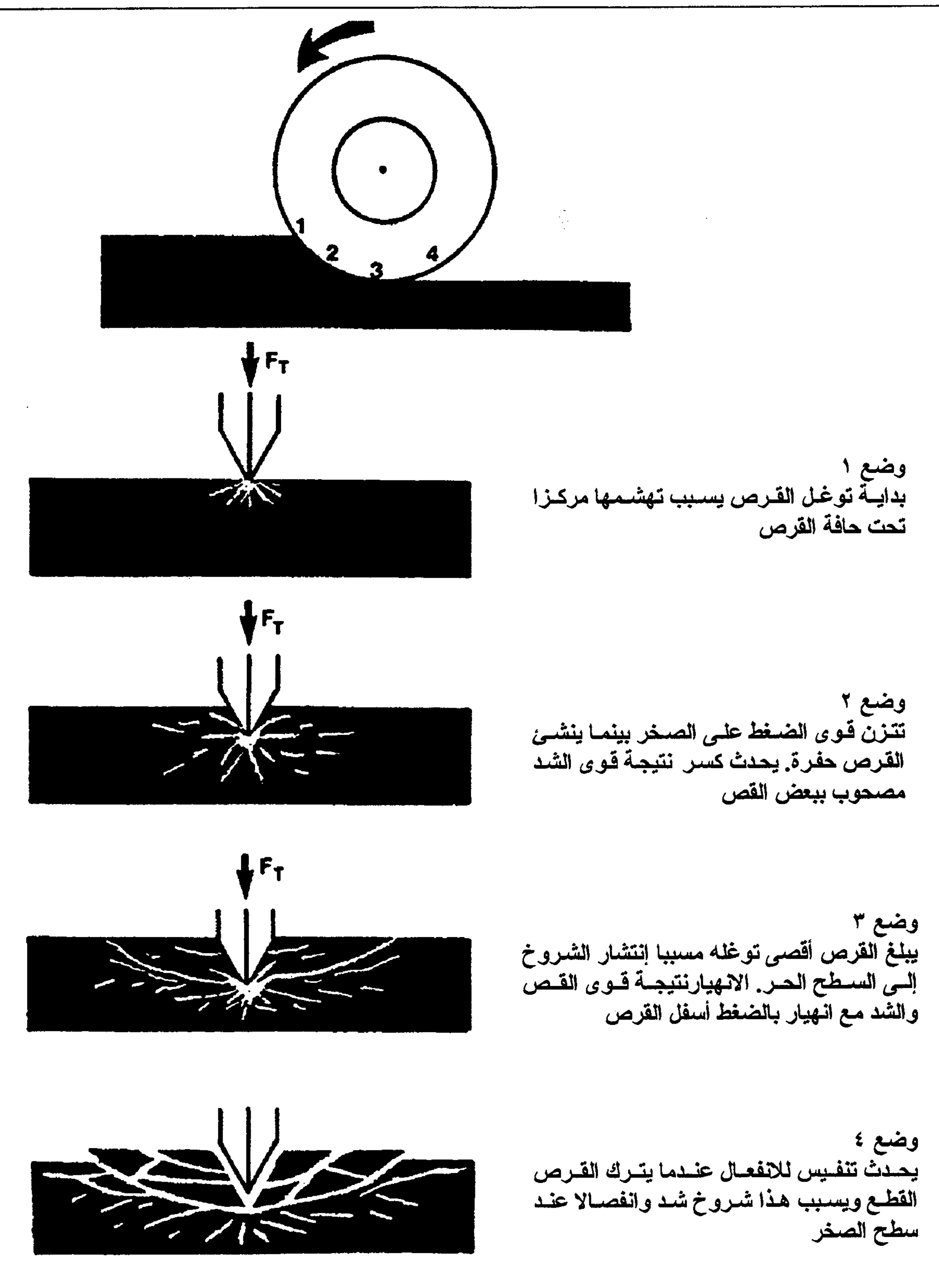
وتحدث تشكلات للصخر (Squeezing ground deformations) نتيجة زيادة الإجهادات حول الحفر عن المقاومة الطبيعية. وبالرغم من أن هذه الظاهرة تحدث عادة فى الصخور الطينية (Clayey rock) إلا أنها قد تحدث أيضا لبعض أنواع الصخور ذات النوعية الفقيرة (Poor quality). وترتبط الإجهادات المرتفعة بالأنفاق التى يتم حفرها على أعماق كبيرة من سطح الأرض. كما تحدث هذه الإجهادات العالية فى أنواع أخرى من الصخور مثل الصخور البركانية المسامية عند تعرضها للماء (Free water) فيحدث لها انتفاخ (Swelling) ملحوظ يؤدى إلى ظاهرة السحق (Squeezing).

كما أن هناك بعض الظروف المعاكسة للتربة والتى يمكن اعتبارها كوارث كامنة تحدث أثناء الحفر للأنفاق مثل :

١- الكهوف فى الحجر الجيرى المملوءة بحطام الفوالق والمشبعة بالماء.
٢- مناطق الفوالق الواسعة المشتملة على مقعر (Gauge) من الطين والرمل تحت ضغط مياه مرتفع.
٣- الصخور تحت الضغوط العالية ذات القابلية الكامنة للانفجار عندما تتعرض لتخفيض الضغط (Relief strain) أثناء عملية الحفر.
٤- الجيوب الممتلئة بالغازات الضارة تحت ضغط مرتفع والتى لها قابلية كامنة للانفجار أو التسرب داخل النفق أثناء الحفر.



أ- تأثير قرص قاطع على صخر ونوع الانهيار القصى.
يسهل قص الصخر مع إزالته بالنفاثات المائية الموجهة له [١٢-٢]



ب- بيان طريقة انـهيار الصخر أثناء مراحل عمل قرص قاطع على مقدمة الصخر

شكل (١٢-١٣) الميكانيزم الرئيسى لكسر الحجر بالقرص القاطع [١٢-٢]

١٢-٧ معالجة التربة لحفر الأنفاق

تهدف معالجة التربة لشق الأنفاق إلى تحسين التربة لضمان استمرارية وتقدم عملية الحفر دون تأخير ولإحكام السيطرة لمنع تسرب المياه أو الحطام (Debris) إلى داخل النفق. ويتضمن هذا التحسين للتربة نزح المياه الأرضية من أى مجرى مائى تحت سطح الأرض أو أى مستودع ماء أرضى (Aquifer) قريب من موقع النفق والتحكم فى تسرب المياه إلى داخل النفق بواسطة الهواء المضغوط وتثبيت التربة بواسطة الحقن بالأسمنت أو التجميد.

ولعل أهم عامل يتحكم فى نجاح أو فشل عملية إنشاء النفق يتمثل فى السيطرة الصائبة على المياه الأرضية ويجب أن يؤخذ هذا العامل فى الاعتبار منذ المراحل الأولى لتصميم مشروع النفق.

وتوجد مشكلة أخرى شائعة عند تنفيذ الأنفاق تتمثل فى إنشاء النفق فى تربة ذات تماسك ضعيف (Weak cohesionless soil) حيث تواجه عملية إنشاء نظام السند (Support) فى هذه التربة صعوبات كثيرة.

١٢-٧-١ طرق معالجة التربة

تتلخص الطرق المتاحة للسيطرة على المياه الأرضية وتحسين التربة فيما يلى :

١- نزح الماء الأرضى (Dewatering) بإستخدام الآبار.
٢- التناضح الكهربى (Electro-osmosis).
٣- حقن التربة (Grouting).

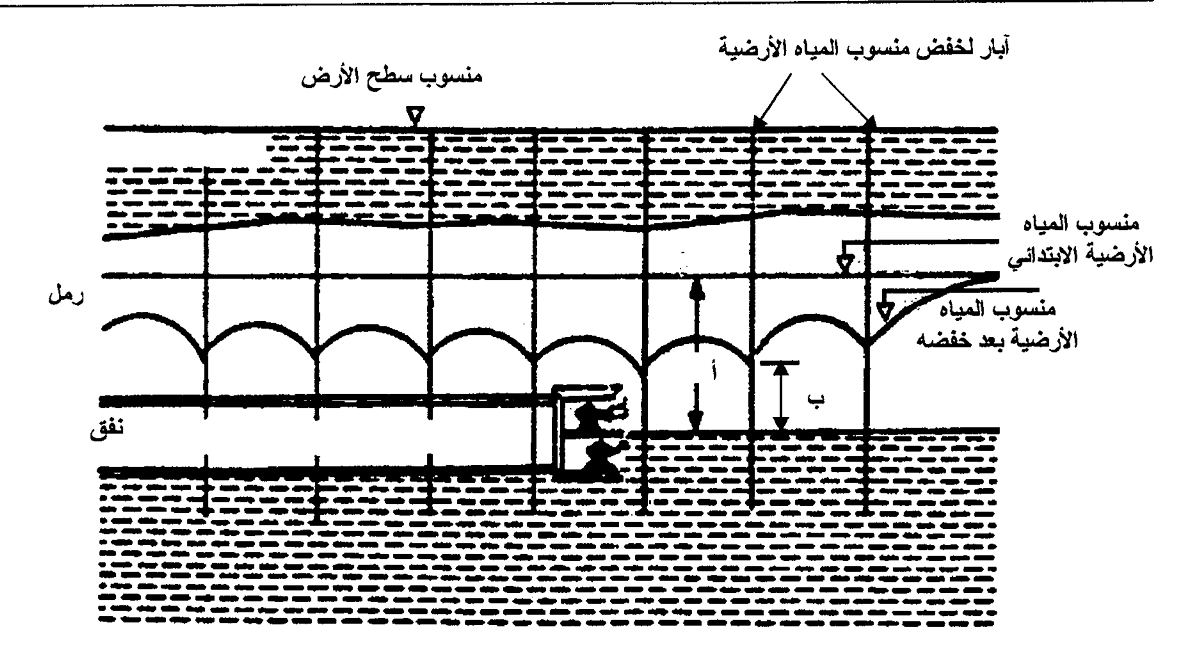
ويعتمد إختيار الطريقة المناسبة لمعالجة التربة على نتائج استكشاف الموقع والإختبارات المصاحبة له (بند رقم ١٢-٤).

١٢-٧-١-١ نزح الماء الأرضى

يتلخص أسلوب هذه الطريقة فى التخفيض الصناعى لمنسوب المياه الأرضية عن طريق حفر سلسلة من ثقوب الحفر على جانبى مسار النفق ثم ضخ المياه إلى الخارج بواسطة مضخات سطحية أو مضخات غاطسة (Submersible) . والنتيجة النهائية المرجوة من هذه العملية هى تخفيض أو إزالة ضغط عمود الماء على مسار النفق. ويوضح الشكل (١٢-١٤) الخطوط العريضة لهذه العملية والتى تعرف بطريقة الآبار (Well-pointing) .

والاعتبارات الأساسية فى تنفيذ هذه الطريقة تتمثل فى :

١- التباعد بين الآبار وعمق هذه الآبار والقدرة المطلوبة للمضخة.
٢- إستخدام مضخات سطحية أو غاطسة.
٣- هبوط التربة نتيجة تخفيض منسوب المياه وخطر الإضرار بالمنشآت القريبة.
٤- تصريف آية مياه راكدة (Perched).
٥- تسرب العوالق الدقيقة (Fines) إلى المضخة.
٦- تغير مسامية التربة.

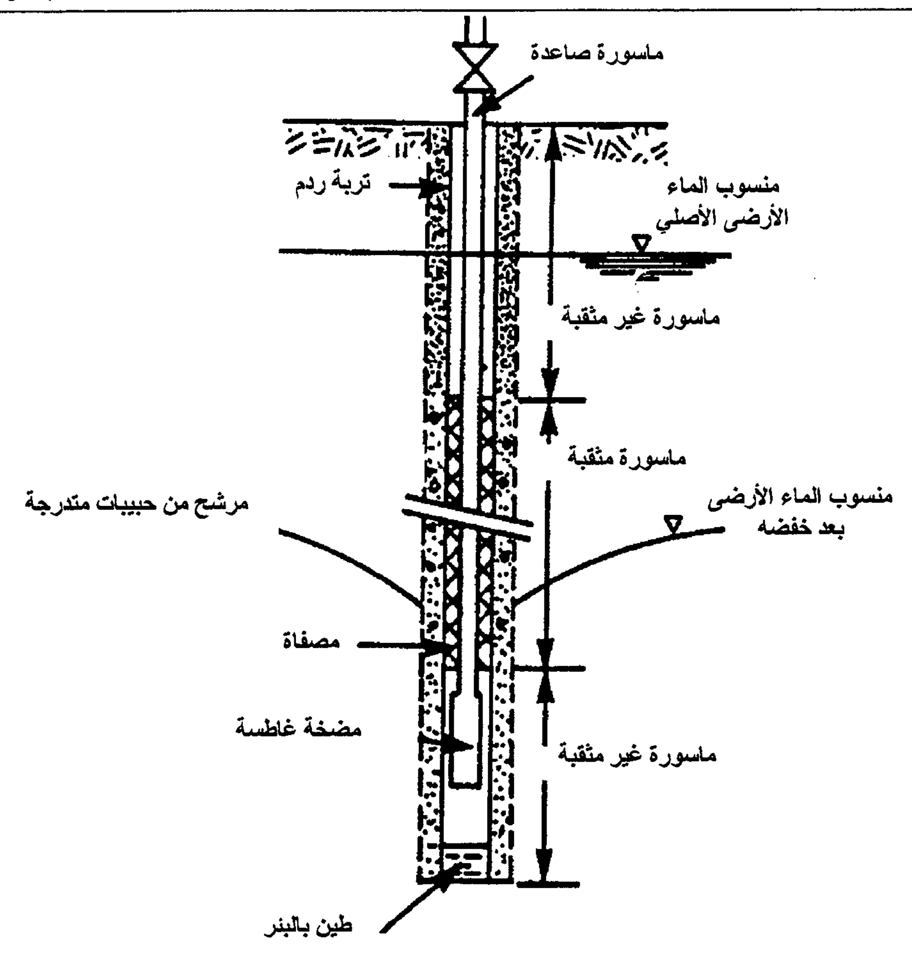


شكل (١٢-١٤) عملية تخفيض الضغط بإستخدام الآبار [١٢-٣٠]
أ- الضغط الأصلى للمياه.
ب- ضغط المياه بعد إستخدام الآبار.

ويمكن حساب القدرة المطلوبة للضخ (Pumping) إعتمادا على عمق النفق وارتفاع عمود الماء المطلوب تخفيضه ومسامية التربة. واستنادا إلى هذه القدرة المحسوبة يمكن تقرير إستخدام مضخات سطحية أو طلمبات غاطسة علما بأن تكاليف إستخدام مضخة غاطسة يفوق بكثير إستخدام مضخة سطحية.

وفى حالة الضخ السطحى (Surface pumping) تكون ثقوب الحفر (Bore holes) متقاربة ويكون هذا الضخ ذا كفاءة عالية فى التربة الرملية والزلطية وعلى أعماق من ٥ - ٦ متر من سطح الأرض. ويتيح إستخدام المضخات الغاطسة (Submersible) فى الآبار العميقة المتباعدة تخفيض منسوب المياه الأرضية على أعماق أكبر من تلك التى يستخدم فيها الضخ السطحى. وهذا الأسلوب يصلح أيضا للتربة الرملية والتربة الزلطية والتربة المكونة من الصخور المكسورة (Fractured rock) ويوضح الشكل (١٢-١٥) تفاصيل البئر العميق (Deep well) مع المضخة الغاطسة. وطبيعى أن يحاط البئر بمرشح رملى (Sand filter) لمنع تسرب العوالق الناعمة إلى داخل المضخة. ومع ذلك فيجب تصميم المضخة لتعمل بكفاءة مع وجود مثل هذه العوالق وتكون فى نفس الوقت ذات قدرة كافية فى الضخ لتتغلب على كثافة الطين السائل (Slurry) المتزايدة الناتجة من وجود هذه العوالق الناعمة.

ويجب الأخذ فى الاعتبار تأثير تخفيض المياه بواسطة الآبار على قواعد المنشآت القريبة وأيضا على اتزان واستقرار التربة. كما يجب تصريف آية مياه راكدة (Perched water table) بثقب الطبقة غير المنفذة التى يتجمع فوقها الماء.



شكل (١٢-١٥) تفاصيل بئر عميق [١٢-٥]

ويوجد العديد من المعادلات المتاحة مرجع (12-3) التى يمكن عن طريقها تقدير كمية الماء التى يجب ضخها من ثقوب الحفر لتحقيق النزح (drawdown) المطلوب سواء فى مستودعات الماء الأرضى المحصورة (Confined aquifer) أو مستودعات الماء الأرضى غير المحصورة (Unconfined aquifer) ومعظم هذه المعادلات مستنتج من المعادلة القياسية (Standard) المسماة (Theim equation) ويبين الشكل (١٢-١٦) المتغيرات المتعلقة بإستخدام المعادلتين التاليتين لحساب كمية الماء :

فى مستودعات الماء الأرضى المحصورة (Confined aquifer)

$$Q_c = 2\,\pi\, k\, b\, (H - h) / 2.3 \log (r_o / r_w) \qquad (12\text{-}7a)$$

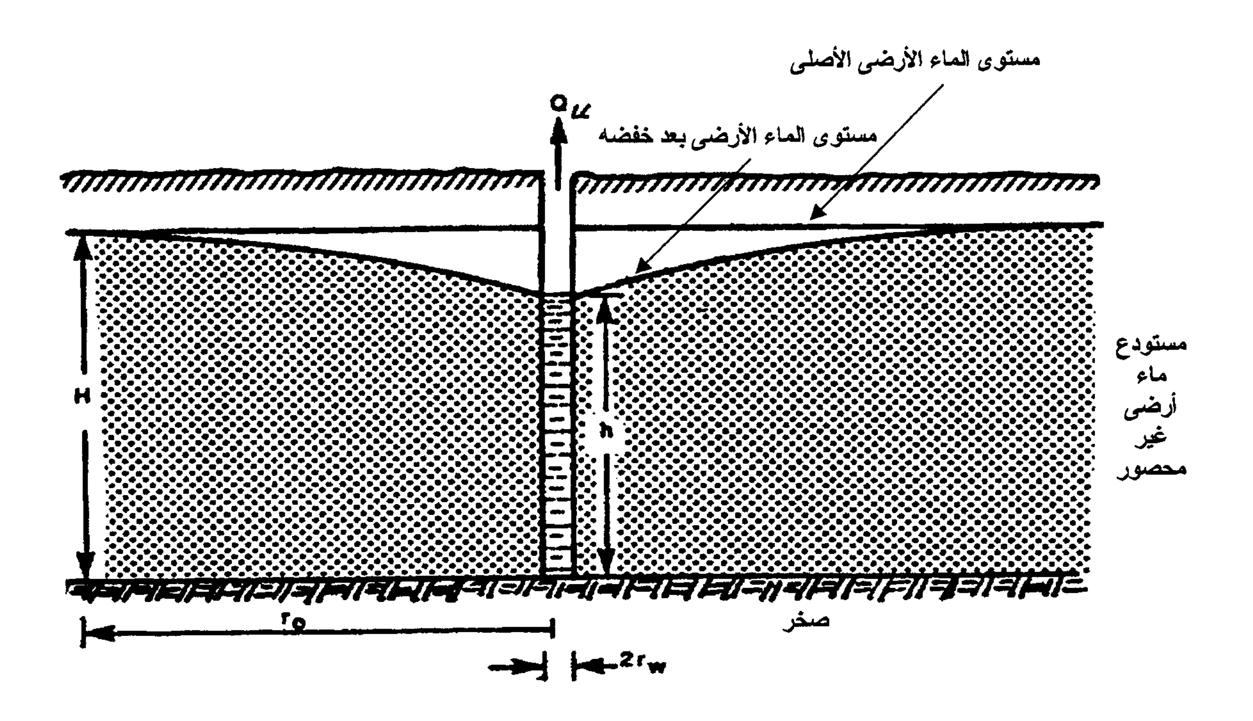
فى مستودعات الماء الأرضى غير المحصورة (Unconfined aquifer)

$$Q_u = \pi\, k\, (H^2 - h^2) / 2.3 \log (r_o - r_w) \qquad (12\text{-}7b)$$

حيث

Q_c = معدل التدفق (Flow rate) من البئر (مستودعات الماء الأرضى المحصورة)
Q_u = معدل التدفق (Flow rate) من البئر (مستودعات الماء الأرضى غير المحصورة)

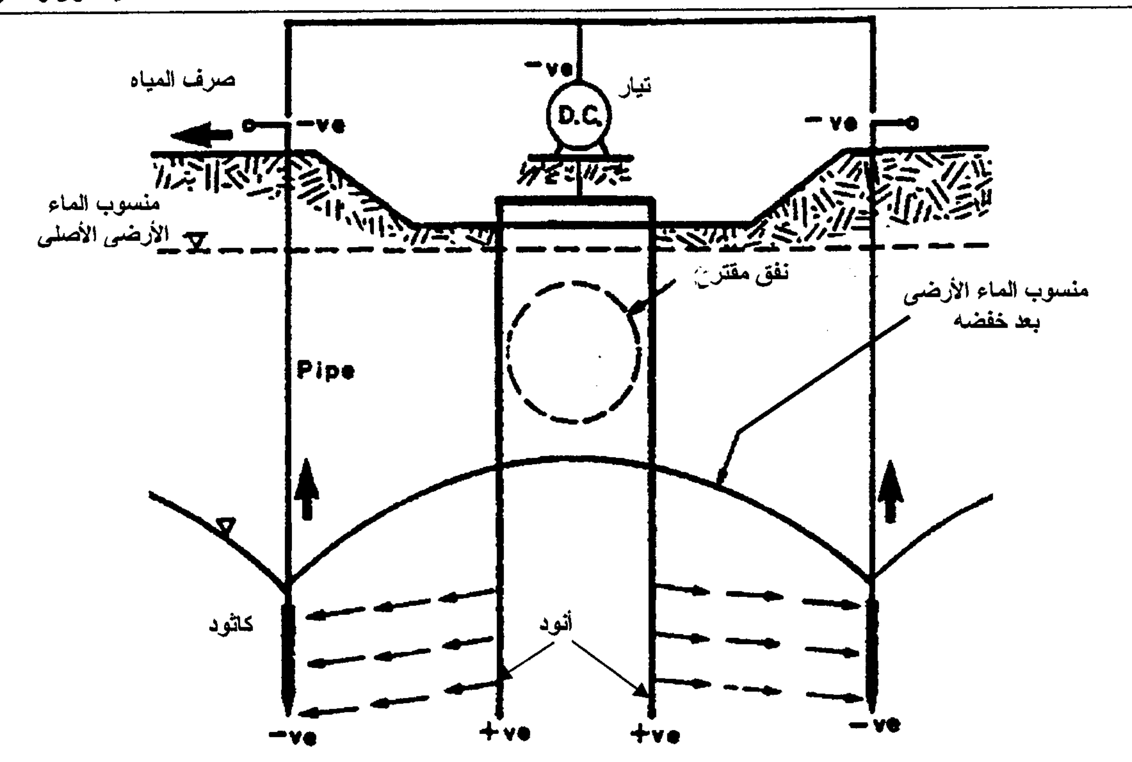
k = معامل النفاذية
b = سمك المستودع (Aquifer)
H = ارتفاع منسوب المياه فوق النفق
h = الارتفاع من منسوب النفق إلى منسوب أقصى تخفيض للمياه (Drawdown) فى البئر
r_o = نصف قطر التخفيض (Radius of drawdown depression)
r_w = نصف قطر البئر



شكل (١٢-١٦) تسرب قطرى فى مستودع ماء أرضى غير محصور [١٢-٣]

١٢-٧-١-٢ التناضح الكهربى Electro-Osmosis

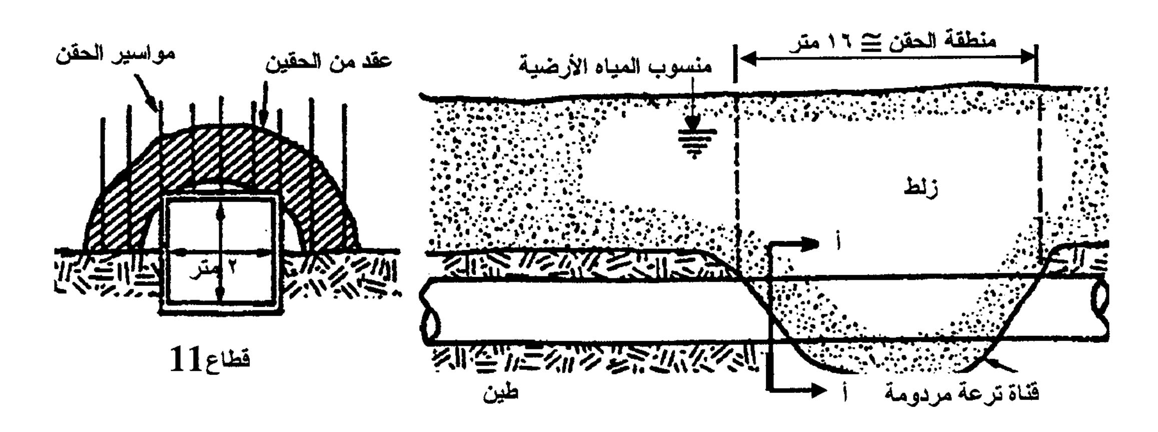
يستخدم أسلوب التناضح الكهربى (Electro-osmosis) لنزح الماء لتثبيت التربة الطينية الرخوة (Soft clay) والتربة الطمييه (Silt) والتى لا يناسبها إستخدام طريقة الآبار التقليدية. ويعتمد هذا الأسلوب على مبدأ التحليل الكهربى (Electrolysis) عن طريق قطبين كهربيين يتم غرسهما بالتربة وتمرير تيار مباشر بينهما. ونظرا للتفاعلات الكيميائية (Chemical processes) المصاحبة للتحليل الكهربى فإن جزيئات الماء تنجذب إلى القطب السالب (Cathode) ومنه يمكن ضخ هذه الجزيئات بسهولة. ويوضح الشكل (١٢-١٧) تفاصيل هذا الأسلوب. ونظرا للتكلفة المرتفعة لهذا الأسلوب والتجهيزات المعقدة التى يسهل تنفيذها للحفر المفتوح (Open cut) وليس للأنفاق تحت سطح الأرض فإن هذا الأسلوب لا يستخدم بكثرة فى تثبيت التربة فى حالة هذه الأنفاق.



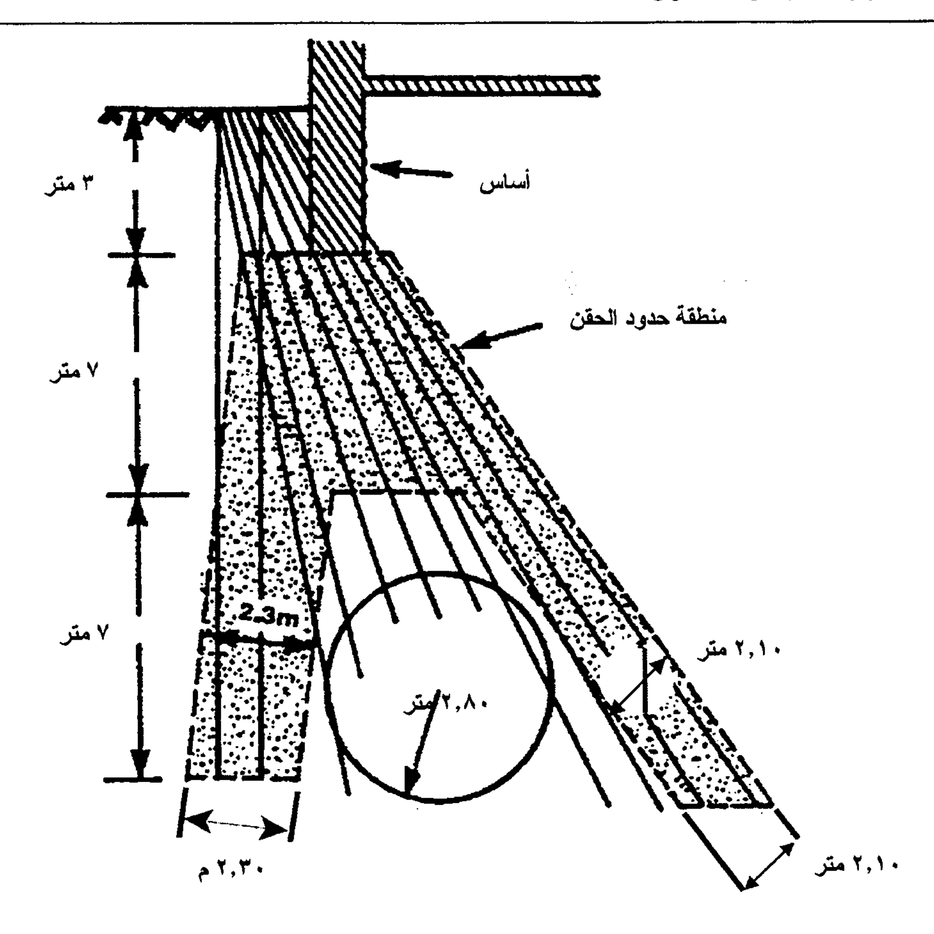
شكل (١٢-١٧) أسلوب تخفيض منسوب المياه بالتناضح الكهربي [١٢-٥]

١٢-٧-١-٣ حقن التربة Grouting

يمكن تعريف حقن التربة بالأسمنت (Grouting) بأنه حقن سائل تحت ضغط خلال فراغات التربة أو شروخ الصخر أو تجاويف الحجر خلف طبقة تبطين النفق (Tunnel linings) وبمرور الوقت يتحول هذا السائل إلى الحالة الصلبة بالتأثير الكيميائى أو الفيزيائى والهدف الأساسى من حقن التربة فى عملية حفر الأنفاق هو إما غلق الفراغات والمسارات فى التربة أو الصخر لمنع مرور المياه الأرضية خلالها إلى الحفر أو زيادة المقاومة الكلية للتربة للسماح بإنشاء النفق بدون تعطيل ناتج عن حركة التربة (Running ground) أو لزيادة الأمان أثناء عملية إنشاء النفق أو لهذه الأغراض مجتمعه. ويوضح الشكلين (١٢-١٨) ، (١٢-١٩) المبادئ العامة المستخدمة فى عملية حقن التربة.



شكل (١٢-١٨) نموذج لحقن تربة أثناء حفر نفق مجارى[١٢-٦]،[١٢-١٤]،[١٢-٣٦]
ملحوظة : يتم الحقن من السطح



شكل (١٢-١٩) نموذج لنظام حقن يكون عقدا لتدعيم المنشأ [١٢-٦]،[١٢-١٤]،[١٢-٣٦]

وهناك مجال واسع متاح للإختيار بين طرق حقن التربـة ونوعيـة الحقين (Grout) المستخدم فى الحقن إعتمادا على الغرض المطلوب من هذا الحقن وخصـائص التربـة أو الصـخر المحقون ونسبة الفراغـات والمسامية وغيرها.

أولا : أنواع الحقين Grout Types

يمكن تصنيف الملاط إلى نوعين رئيسيين : الحقين المعلق (Suspension grout) و الحقين السـائل أو الكيميـائى (Chemical or liquid grout) . وهنـاك العديد من المتطلبـات التـى يجب أن تتوافر فـى خصائص الحقين والتى تشمل :

١- الثبات والاستقرار (Stability) والذى يقتضـى ألا تتبدل حالة الحقين أثناء خلطـه أو حقنـه فلا يحدث ترسيب قبل الأوان للحقين المعلق أو شك سابق للأوان الحقين السائل أو الكيميائى.
٢- حجم الحبيبات (Particle size) فيجب أن يمثل حجم حبيبـة للحقين المعلق حدا أدنـى بالنسبة لحجم حبيبات التربة التى يجب اختراقها.
٣- لزوجة الحقين هى مقياس لمدى قابليته لاختراق التربة ذات الحبيبات الدقيقة.
٤- مقاومة الحقين بعد التجمد أو الشك (Strength) التى تقدر بـالنظر إلـى الغرض منـه إذا كـان لتقويـة التربة أو لمنع مرور المياه فيها. وأيا كان هذا الغرض فيجب أن تكون مقاومـة الحقين كافيـة لمقاومـة الميل للزحف (Creep tendencies).
٥- الاستمرارية والثبـات (Permanence) بعد شك الحقين يجب أن يقـاوم بكفـاءة التـأثيرات الكيميائيـة (Chemical attacks) والتآكل (Erosion) الناتج عن المياه الأرضية.

أ- الحقين المعلق Suspension Grout

يتكون الحقين المعلق أساسا من الأسمنت البورتلاندى المذاب فى الطين السائل (Clay slurry) وبحيث تتراوح نسبة الأسمنت إلى الماء (Cement / water ratio) بين ٠,١ - ٠,٤ (12-28),(12-6) وتتمثل وظيفة الطين فى هذا الحقين فى خفض استهلاك الأسمنت وفى تحسين التثبيت والاستقرار (Stability) ولزوجة الحقين المعلق. وبالإضافة إلى هذه المكونات يمكن إضافة بعض الإضافات (Additives) لتحسين بعض الخصائص الأخرى للحقين ومن أمثلة هذه الإضافات الرمل فى حالة حقن الشروخ الكبيرة (Wide fissure) والأملاح المعدنية (أملاح الصوديوم ، أملاح البوتاسيوم ، ....) والتى تؤدى إلى تنافر ذرات الطين بحيث تبقى مشتتة فى المعلق ولا تتكدس فتفسد خواص المعلق.

ويناسب الحقين المعلق عمليات الحقن فى الصخور المشروخة (Fissured rocks) والتربة ذات الحبيبات المحتوية على فراغات ومسام واسعة. وتستخدم المونة (Mortar) المكونة من الحقين المعلق المختلط بالرمل والأملاح المعدنية فى سد (Plug) الشروخ الواسعة والتجاويف (Cavities) . ولايناسب الحقين المعلق عمليات الحقن فى التربة المسامية ذات الحبيبات الدقيقة (Fine graind porous soil) نظرا لكبر حجم الذرات فى المعلق بحيث لا يمكنها اختراق الفراغات الصغيرة فى هذه التربة. ويمكن تقدير مدى اختراق حبيبات الأنواع المختلفة من الأسمنت لفراغات التربة استنادا إلى الجدول التالى :

نوع الأسمنت	معامل النفاذية للتربة (سم / ثانية)	القطر الذى يمر منه ٨٥% من حبيبات الأسمنت (مم)	القطر الذى يمر منه ١٥% من حبيبات التربة (مم)
أسمنت بورتلاندى عادى	٠,٢٣	٠,٠٤٧	٠,٨٧
أسمنت ذو قوة مبكرة عالية High early strength cement	٠,١٣	٠,٠٣٣	٠,٦٧
أسمنت ناعم Colloidal fine cement	٠,٠٣٢	٠,٠١٩	٠,٣٨
أسمنت فائق النعومة Ultra fine cement	٠,٠٠٣٥	٠,٠٠٦	٠,١٢

ب- الحقين الكيميائى أو السائل Chemical / Liquid Grout

يتكون الحقين الكيميائى أو السائل من محاليل (Solutions) وراتنجات (Resins) لتكوين مواد غروية (Gels) تؤدى إلى خفض نفاذية التربة عن طريق ملء الفراغات وبالتالى تقوية تكوين هذه التربة. ويتميز الحقين الكيميائى أو المائى عن الحقين المعلق بإمكانية حقنة فى التربة المسامية ذات الحبيبات الدقيقة حيث تقترب لزوجة الحقين من لزوجة الماء مما يوفرله درجة عالية من الاختراق فى التربة شديدة النعومة. ويتوقف أداء الحقين الكيميائى أو السائل على بعض العوامل التى تؤثر على خواصه مثل:

- المتانة (Durability) : متانة المادة الغروية (Gel) يمكن أن تتأثر بالتفاعلات الكيميائية الممكنة بين المواد المستخدمة فى الملاط وبعض الأملاح المذابة فى المياه الأرضية (Ground water) حيث يمكن أن تؤدى هذه التفاعلات إلى الاضمحلال البطيء لخواص المادة الغروية.
- لزوجة المادة الغروية تحدد قابلية هذه المادة على اختراق التربة ويمكن تحديد هذه الخاصية عن طريق التجارب المعملية.

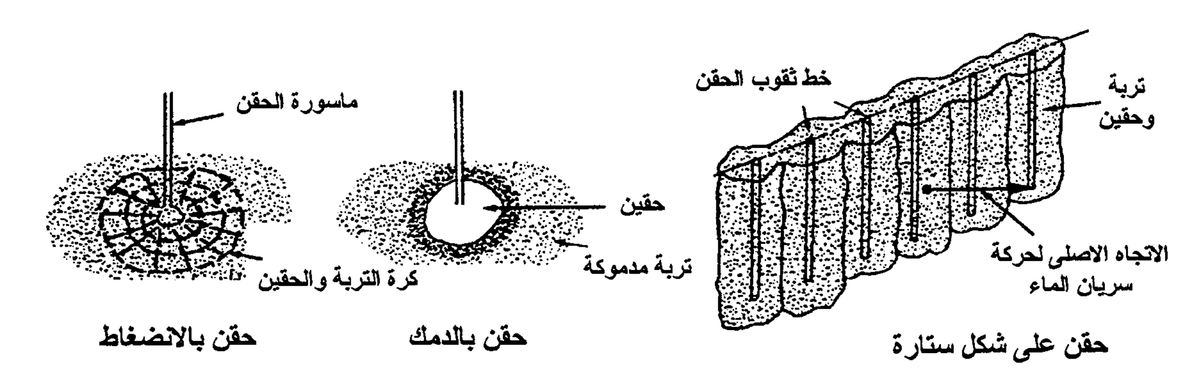
- مقاومة المادة الغروية (Strength) : تعد مقاومة المادة الغروية للحقين الكيميائى أو السائل أقل من مقاومة الحقين الأسمنتى (Cement grout) فبينما تحسن المادة الغروية من تماسك التربة (Cohesion) فإنها تؤثر هامشيا على زاوية قوة القص (Angle of shear strength) . بالتالى فإن هذه الغرويات يمكن أن تزيد من مقاومة التربة ذات الإجهادات المنخفضة بينما يكون تأثيرها غير محسوس للتربة ذات الإجهادات المرتفعة.
- زمن تصلد المادة الغروية : يتوقف هذا الزمن على تركيز المحلول والراتنج. ويعد هذا الزمن هاما لتقدير زمن الضخ المتاح للحقين الكيميائى أو السائل قبل أن تبدأ لزوجته فى الزيادة الحادة تمهيدا لشكله النهائى.
- سمية (Toxicity) الحقين الكيميائى أو السائل تتمثل أهمية هذه السمية فى أمرين صحة وأمان العاملين فى الحقن وأيضا تلوث المياه الأرضية مما يضر بالبيئة المحيطة.
- تكلفة عملية الحقن : تتراوح تكلفة الكيماويات المستخدمة بين ١ إلى ٢٠ بينما تتراوح تكلفة الإعداد والحقن بين ١ إلى ٣ (12-41) وبالتالى يجب حساب تكلفة الخطط المختلفة للحقن للوصول إلى الحل الأمثل من وجهة نظر التكلفة.

ثانيا : طرق حقن التربة Grouting Methods

توجد ثلاثة طرق لحقن التربة تستخدم عادة فى عمليات حفر الأنفاق :

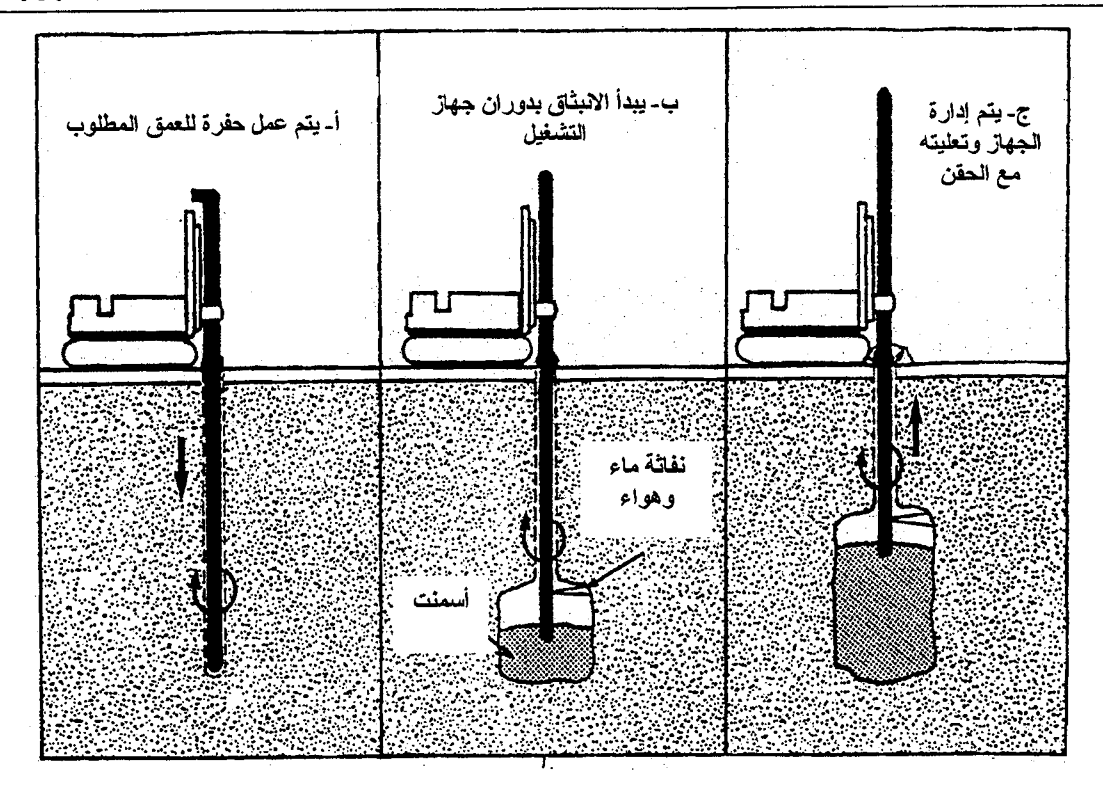
١- الحقن بالانضغاط Consolidation.
٢- الحقن بالدمك Compaction Grouting.
٣- الحقن بالإنبثاق (الضخ) Jet Grouting.

ويعرف الحقن بالانضغاط بأنه الحقن الذى يتم خلاله تخلل الحقين (Grout) فى التربة دون قلقلتها (Disturbing) لتكوين كرات (Bulbs) من خليط التربة و الحقين كما يتضح من الشكل (١٢-٢٠).



شكل (١٢-٢٠) طرق لحقن التربة [١٢-٣]

ويتم الحقن بالدمك (Compaction Grouting) بضخ حقين شديد اللزوجة غير قادر على اختراق مسام التربة (Soil pores) وبالتالى يؤدى إلى إزاحة هذه التربة جانبيا ودمكها كما يتضح من الشكل(١٢-٢٠) . أما الحقن بالانبثاق (Jet Grouting) فيتضمن تكسير وكسح التربة فى المنطقة المجاورة لثقب الحفر واختلاطها بالحقين لتكوين عمود من التربة المختلطة بالحقين. ويوضح الشكل (١٢-٢١) هذا الأسلوب فى الحقن.



شكل (١٢-٢١) إنشاء عمود الحقن بالانبثاق [١٢-٥]

ثالثا : تصميم نظم الحقن Design of Grout Systems

يجب الأخذ فى الاعتبار العوامل التالية عند تنفيذ عملية الحقن :

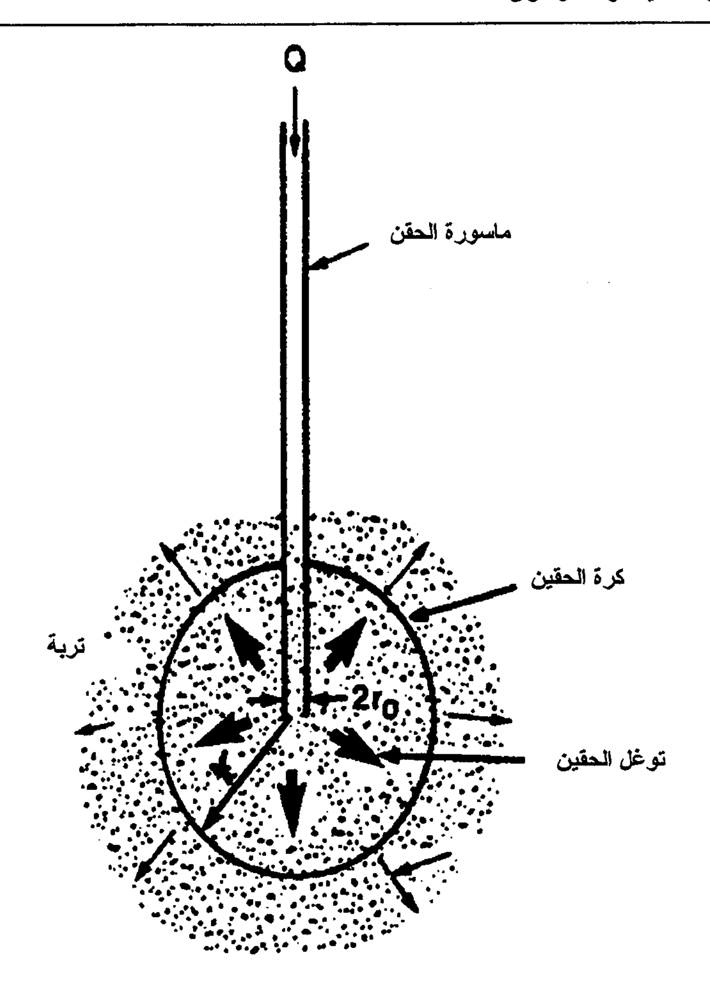
١- فحص جيولوجية المياه الجوفيه (hydrogeological) وفحص التربة (Geotechnical) عن طريق الحفر وأخذ العينات والمسح البيزومترى والإختبارات الحقلية.

٢- الإختبارات المعملية لتحديد خصائص التربة المؤثرة على قابلية الحقن مثل التوزيع الحجمى لحبيبات التربة.

٣- الإختبارات المعملية لإختيار أنسب أنواع الحقين وملاحظة تغير مقاومته وخصائصه مع الزمن.

٤- إختبارات حقلية على عملية الحقن عند الضرورة.

ويمكن إستخدام معادلات خاصة بإنتشار كرات الحقين (Grout bulbs) وذلك بإفتراض أنه فى التربة المتجانسة فإن الحقين ينتشر قطريا إلى الخارج من طرف ماسورة الحقن ليكون كرات من التربة المختلطة بالحقين كما هو مبين بالشكل (١٢-٢٢).



شكل (١٢-٢٢) توسع كرة حقين نموذجية فى تربة متجانسة [١٢-٥٥]

ويمكن تقدير قيمة نصف قطر كرة الحقين r شكل (١٢-٢٢) من العلاقة التقريبية (|12-47):

$$r = [\,3\,k\,h\,t\,r_0 / n\,]^{1/3} \qquad (12\text{-}8)$$

حيث

k = معامل النفاذية للتربة
h = الارتفاع الذى يتم منه الحقن
t = الزمن
r_0 = نصف قطر ماسورة الحقن
n = مسامية التربة

رابعا : الضغوط المستخدمة فى عملية حقن التربة Grouting Pressures

توضح العوامل التالية كيفية تحديد الضغوط القصوى المسموح بها فى عملية حقن التربة :

١- يجب ألا تسبب هذه الضغوط رفع التربة أو الأساسات وبالتالى فيجب أن تكون أقل من الضغط الناتج عن وزن التربة (Overburden pressure).
٢- يجب أن تكون زيادة هذه الضغوط متدرجة أثناء عملية الحقن.
٣- الضغوط العالية للحقن يمكن أن تتسبب فى تكسير الصخور المحيطة ويجب تجنب ذلك فى عمليات حفر الأنفاق.

١٢-٨ المخاطر المصاحبة لإنشاء الأنفاق Hazards in Tunneling

يقصد بالمخاطر المصاحبة لإنشاء الأنفاق بعض الظواهر الطبيعية التى تتسم بالخطر. والكثير من هذه المخاطر يمكن التنبؤ بها وأخذها فى الاعتبار فى مرحلة تصميم النفق بدقة وتفصيل كبيرين بما يضمن سهولة إنشاء النفق وأمان إستخدامه وصيانته.

ولكى يتم التنبؤ بهذه المخاطر وأخذها فى الاعتبار أثناء مرحلة التصميم فيجب أن تكون الدراسات والفحوصات والاستكشافات للموقع بجميع أنواعها والسابق ذكرها فى البند رقم (١٢-٤) كافية وملائمة. وقد تؤدى هذه المخاطر إلى حدوث انهيارات فى الأنفاق (Tunnel failure) . وتتنوع أنماط انهيار الأنفاق بين الانهيارات الطبيعية (Physical collapses) والانفجارات (Explosions) واندفاع الماء أو الفيضان (Inrush of water) . وعموما يمكن تصنيف انهيارات الأنفاق إلى رتبتين رئيسيتين :

١- انهيارات تحدث أثناء تنفيذ النفق.
٢- انهيارات تحدث بعد الانتهاء من النفق وإستخدامه.

ومعظم الانهيارات تحدث أثناء تنفيذ النفق.
ويمكن تعزية أسباب بعض انهيارات الأنفاق إلى الأسباب التالية (12-8):

١- فيضان الماء (Flooding) والذى يحدث عند اعتراض مسار النفق لأنواع خاصة من طبقات التربة الحاملة للمياه ، أو عند انفجار مواسير المياه أو توقف المضخات عن العمل أو تدفق الماء من مدخل أو بوابة (Point of access).
٢- انهيار أرضى عند مقدمة النفق (Ground collapse at the tunnel face) ويمكن أن يكون مصحوبا بتدفق للمياه الأرضية .
٣- انهيار نظام السند (Support failure) سواء كان نظام السند المؤقت أو النظام الدائم ويمكن أن يكون مصحوبا بتدفق للمياه الأرضية.
٤- انبعاث الغازات والانفجارات، والكثير من الغازات الملوثة يمكن انبعاثها فى جو النفق حيث توجد هذه الغازات أصلا فى طبقات التربة وتجد طريقها إلى النفق من خلال الفراغات والشروخ والكسور. كما أن التفجير يعد مصدرا رئيسيا لتولد عدة غازات فى النفق وأيضا محركات الإحتراق الداخلى تمثل مصدر لعديد من الغازات الملوثة. وتعد الحرائق أيضا مصدرا من مصادر الغازات كما أن تنفس المتواجدين بالنفق ينتج عنه ثانى أكسيد الكربون. وأيضا إعادة شحن البطاريات داخل فراغ النفق ينتج عنها الهيدروجين. ولعل أشد الغازات المنبعثة داخل النفق خطورة هو غاز الميثان والذى يكون عادة فى طبقة ذات أصل عضوى وهو غاز قابل للانفجار ويمكن أن يجد طريقه إلى داخل النفق من خلال الفراغات والكسور أو من خلال ماسورة تالفة للخدمة العامة.
٥- نقص الأكسجين ويرتبط بالهواء المضغوط فى النفق أثناء التنفيذ.
٦- الحرائق وتنشأ عن المواد القابلة للاشتعال والمتواجدة داخل فراغ النفق مثل الأخشاب والوقود والغاز مع وجود التوصيلات والتجهيزات الكهربية.
٧- الحوادث الناتجة عن حركة الآلات داخل النفق أثناء التنفيذ.
٨- الزلازل خاصة أثناء حفر النفق وقبل الانتهاء منه.

١٢-٨-١ الاحتياطات الواجب اتخاذها لمنع حدوث المخاطر فى الأنفاق

١- التهوية الجيدة : كمية الهواء الطلق المطلوبة داخل النفق يجب ألا تقل عن ٠,٣ م^3 / رجل في ظروف توفر الهواء المضغوط فى النفق. وفى أنفاق المناجم يجب ألا تقل كمية الهواء الطلق عن ٩ م^3 / م^2 من قطاع النفق (مواصفات بريطانية). ويجب أن تكون كمية الهواء الطلق أكبر من الكميات المذكورة سابقا فى حالة توقع انبعاث غاز الميثان. وعموما فإن الحد الأدنى لتركيز الأكسجين فى جو نفق هو ١٩% (مواصفات بريطانية).

٢- تصميم نظام لتصريف غاز الميثان من داخل النفق والعمل على تخفيض تركيزه لمنع اشتعاله وذلك بزيادة التهوية داخل النفق مع الاهتمام بإجراء إختبارات خاصة بتحديد طبيعة غاز الميثان وتركيزه. فإذا زاد تركيز غاز الميثان فى جو النفق عن ٠,٢٥ % فيجب تصميم نظام حماية ضد الانفجارات فى صورة واقى اللهب (Flame proof) مع إستخدام معدات وأجهزة ذات أمان ذاتى. أما إذا ارتفع تركيز الميثان فى جو النفق إلى ١ % فإنه يحظر إستخدام المتفجرات والقاطرات والمعدات الكهربية غير ذاتية الأمان. فإذا زاد التركيز عن ١,٢٥ % فيجب سحب العاملين داخل النفق إلى الخارج عدا العاملين المختصين بعملية الأمان ، وإذا تعدى التركيز ٢ % فيجب سحب جميع العاملين داخل النفق إلى خارجه.

٣- منع الحرائق باتخاذ عدد من الإجراءات منها : منع التدخين أو اللهب المكشوف بجوار المواد القابلة للاشتعال ، تزويد خطوط إمداد الوقود بصمامات التحكم اللازمة ، عزل أسلاك وكابلات التوصيلات الكهربية بعناية ، عدم السماح بتراكم الحطام سريع الاشتعال داخل النفق ، عدم تخزين أسطوانات الأكسجين بالقرب من منتجات البترول ، التهوية الجيدة لموقع محطة شحن البطاريات ، الصيانة الدائمة لمعدات إطفاء الحرائق مع وضعها فى أماكن واضحة وسهلة الوصول إليها وتدريب العاملين فى النفق على إستخدامها ، وضع نظام إنذار ضد الحريق لإنذار العاملين سواء داخل فراغ النفق أو على سطح الأرض ، وضع خطط هروب وإخلاء من أخطار الحرائق موضح بها مسارات الهروب مع إعلام العاملين بها ، إختيار نظام آمن مناسب لتبطين النفق وغيرها من الاحتياطات ويمكن الرجوع الى المرجع (12-8) للمزيد من الاحتياطات الواجب اتخاذها لمنع حدوث المخاطرفى الأنفاق.

١٢-٩ سند الأنفاق Support of Tunnels

١٢-٩-١ مقدمة

تحتاج الأنفاق التى يتم حفرها فى معظم أنواع التربة إلى سندها لضمان استقرارها (Stability) وللمحافظة على أبعادها. ويتوقف شكل ووظيفة السند على العديد من العوامل والاعتبارات حتى يبدو أنه بكل نفق مختلف نظام تبطين مختلف (Different lining solution) ويمكن تقسيم نظم سند (تبطين) الأنفاق إلى ثلاثة أنماط يمكن إستخدام بعضها أو جميعها فى نفق ما :

١- السند المؤقت للتربة (Temporary ground support) : ويستخدم هذا النمط من السند عند مقدمة النفق (Tunnel face) المنفذ فى الصخر ويتم هذا السند بواسطة الخرسانة المقذوفة (Shotcrete) أو أطقم الصلب (Steel sets) . ولا يستخدم السند المؤقت فى الأنفاق المحفورة فى التربة الرخوة بأسلوب درع الوقاية (Shield) حيث يوفر جسم الدرع ذاته السند المطلوب فى هذه الحالة.

٢- التبطين الأبتدائى (Primary lining) : ويمثل هذا التبطين المكون الإنشائى الرئيسى فى نظام سند النفق والمطلوب لتحمل الأحمال والتشوهات التى تولدها التربة المحيطة بالنفق خلال العمر الإفتراضى له وأيضا الأحمال الناتجة عن إنشاء النفق واستعماله بالإضافة إلى الأحمال المتولدة عن دفع درع الوقاية (Shield) إلى الأمام أثناء تنفيذ النفق. كما يقوم هذا التبطين الأساسى بالتحكم فى دخول وخروج الماء إلى ومن النفق.

٣- التبطين النهائى (Secondary lining) : ويؤدى هذا التبطين مهاما معينة تكمل مهام التبطين الأبتدائى مثل الحصول على تشطيب جمالى للإستخدام العام مثل أنفاق الطرق وأنفاق المشاة أو لحماية التبطين الأبتدائى من التآكل (Erosion) والصدأ (Corrosion) أو لزيادة عزل الماء (Water proofing) .

١٢-٩-٢ الأنواع الشائعة لنظم سند أنفاق الهندسة المدنية

توجد العديد من الأنواع الشائعة الإستخدام لنظم سند أنفاق الهندسة المدنية تختلف باختلاف طبيعة إستخدام النفق وظروف التربة المشقوق بها ويمكن تلخيص هذه الأنواع فيما يلى (12-58) ,(12-3) :

١- السند الطبيعى للصخر (Natural support in rock) : ويمكن الإعتماد على هذا السند فى حالة الصخر ذى النوعية الجيدة (Good quality) والمعرض لإجهادات منخفضة مقارنة بقوة الصخر.

٢- تدعيم الصخر (Rock reinforcement) : ويستخدم هذا النوع من السند على هيئة شبكة من الصلب مع خرسانة مقذوفة (Shotcrete) وهو سند مؤقت (Temporary support) فى حالة الصخور الهشة (Friable rock) .

٣- الخرسانة المقذوفة : وتستخدم عادة بالاقتران مع شبكة أو شبكتين من الصلب كنظام سند مؤقت فى الأنفاق المشقوقة فى الصخر حيث تستخدم الخرسانة المصبوبة بالموقع كنظام سند أبتدائى (Primary support) . كما تستخدم الخرسانة المقذوفة أيضا كوسيلة لسد المسام السطحية للصخر ولمنع انشطار (Spalling and Slubing) الصخور الضعيفة والمفككة وذلك بالإضافة الى مسامير الصخر.

٤- السند بإستخدام الصلب (Standing steel support) : ويستخدم هذا السند لمجال واسع من ظروف التربة وشكل قطاع النفق ويمكن أن يستخدم كسند مؤقت وعند تغطيته بالخرسانة المصبوبة يتحول إلى نظام سند أبتدائى. ويتميز هذا النوع من السند بمقاومته العالية للضغط والشد.

٥- السند على هيئة قطع (Segmental support) : ويعد هذا السند مرنا (Flexible) وينفذ إما من الحديد الزهر (Cast Iron) أو من الصلب (Steel) أو من الخرسانة المسلحة. ويصلح هذا النوع من السند لمجال واسع من ظروف التربة المختلفة. ويقتصر إستخدامه على القطاعات الدائرية للأنفاق.

٦- السند المستمر من الخرسانة (Monolithic Concrete support) : ويعد هذا السند جاسئا (Rigid) ويستخدم كسند أبتدائى فى الأنفاق المحفوره فى الضخر وكتبطين نهائى فى التربة الرخوة ويتميز بخصائص هيدروليكية جيدة وبسيطرة على التسرب (Leakage) . ويتم تنفيذ هذا السند بعد أن يتم استرخاء هام للإجهادات (Significant stress relaxation) فى قطاع النفق حيث أنه تحت تأثير الحمل الكامل تكون عزوم الإنحناء فى السند كبيرة نظرا لجساءته.

٧- السند على هيئة مواسير من الخرسانة سابقة الصب (Precast concrete pipes for jacking) : ويعد هذا السند مناسبا للأنفاق القصيرة الطول نسبيا (أقل من ٤٥٠ متر) ذات الأقطار الصغيرة (١ - ٢,٥ متر) المشقوقة فى التربة الرخوة أو الصخور الضعيفة.

٨- السند الخشبى (Wood support) : يستخدم كسند مؤقت سابق للتبطين الأبتدائى فى ظروف معينة ونظرا لقصر عمرة الإفتراضى فإن إستخدامه قد أصبح محدودا.

١٢-٩-٢-١ تدعيم الصخر Rock Reinforcement

توجد ثلاث طرق مختلفة لتدعيم الصخر :

١- أشاير الصخر (Rock dowels) : وهى عناصر تدعيم لا تتعرض لشد عند تركيبها وتتكون من قضيب (Rod) ولوح سطحى (Face plate) وصامولة (Nut) ووردة (Washer) وعادة ما يكون القضيب مدفونا فى مونه (Mortar) أو فى ثقب مملوء بالحقين (Grout filled hole) .

٢- مسامير الصخر (Rock bolts) : وهى عناصر تدعيم يتم شدها أثناء تركيبها وتتكون من قضيب يتم تثبيته إما ميكانيكيا أو بواسطة الحقين (Grouted) مع وسيلة مناسبة لتوليد الشد فى القضيب والحفاظ على هذا الشد.

٣- روابط الصخر (Rock anchors) : وهى عناصر تدعيم يتم شدها بعد تركيبها وهى ذات قدرة عالية ويزيد طولها على طول مسامير الصخر (Rock bolts) . وتتكون من أعصاب (Tendons) من الصلب عالى المقاومة على شكل كابل يتم توصيله برابط (Stressing anchorage) عند أحد طرفيه وبوسيلة لنقل حمل الشد إلى الكابل عند الطرف الأخر.

وتهدف كل طرق تدعيم الصخر إلى تحسين ثبات واستقرار (Stability) كتلة الصخر. ويوضح الشكل (١٢-٢٣) ميكانيكية تدعيم الصخر (Mechanisms of rock reinforcement) . كما يوضح الشكل (١٢-٢٤) أسس تدعيم الصخر.

ويساعد على إختيار طريقة التدعيم المثلى للصخر وتصميم نظام التدعيم توافر معلومات جيولوجية سليمة عن المجالات التالية :

أ- البناء الجيولوجى لكتلة الصخر (Geological structure of rock mass).
ب- خواص الصخور الصحيحة والفواصل.
ج- قيم واتجاهات الإجهادات المحيطة بقطاع الحفر.
د- درجة التشوهات التى يمكن قبولها.

ويعد إستخدام نظام تدعيم الصخر غير ذى جدوى عند توافر الظروف التالية (12-21):

١- الضغط (Pressure) المطلوب توليده بواسطة نظام التدعيم لحصر التشوهات (Deformation) داخل الحدود المقبولة يتجاوز ٠,٦ ميجا باسكال.
٢- المسافات بين فواصل الصخر (Dominant discontinuities) أقل من حوالى ٦٠٠ مم.
٣- مقاومة الصخر ضعيفة بحيث أن محاولة التدعيم بإستخدام أى من طرق التدعيم تؤدى إلى انهيار الصخر فى موقع التدعيم.
٤- إيضاح نتائج إختبارات المتانة (Durability) والانتفاخ (Swelling) للصخر عدم مناسبة التدعيم.
٥- الصخور ذات المياه شديدة التدفق (High water flow) أو شديدة الضغط.

وتعد الظروف السابق ذكرها محدودة الحدوث فى الصخر وبالتالى فإن عملية تدعيم الصخر تستخدم بكثرة فى أنفاق الهندسة المدنية.

ولكى يكون نظام التدعيم فعالا فيجب أن يتوافر فيه المتطلبان التاليان (12-48):

١- ملاءمة تشوهات طبقات الصخر (Strata deformation) دون حدوث شروخ أو فقد محسوس للمقاومة .
٢- التأثير بإجهاد سند عالى (High retaining stress) على الصخر أثناء التشكل مع عدم تجاوز مقاومة القص لطبقات الصخر.

ولكى يتحقق هذان المتطلبان يجب اعتبار العوامل التالية عند تصميم نظام التدعيم :

- طبيعة نظام الربط.
- نوعية وقطر قضبان الربط (Rods) .
- نوعية لوح السطح (Face plate) .
- صدأ قضبان الربط وخاصة الأجزاء المقلوظة منها (Threaded parts)
- درجة الشد المزود به قضيب الربط (Tensioning) .

ويجب الأخذ فى الاعتبار أن تدعيم الصخر بأى من الطرق المذكورة سابقا لا يوفر حماية كاملة ضد سقوط الصخر (Rock falls) وغالبا ما تستخدم شبكة من الأسلاك (Wire mesh) مع نظام التدعيم لتوفير هذه الحماية. ومن المعتاد أيضا إستخدام الخرسانة المقذوفة (Shotcrete) بالاشتراك مع شبكة الأسلاك مما يوفر حماية إضافية ضد سقوط الصخر وأيضا زيادة مقاومة سند الصخر وحماية لكتلة الصخر من تأثير الاضمحلال (Deterioration) الناتج عن الهواء الرطب أو المياه الأرضية الراشحة داخل النفق. ويعد إستخدام الخرسانة بمثابة نظام سند مؤقت سابق للتبطين الأبتدائى من الخرسانة المصبوبة.

وتتوقف كفاءة نظم التدعيم إلى مدى بعيد على الربط والتماسك (Bond) بين قضيب التدعيم وطبقة الصخر بحيث لا يحدث أى انزلاق (Slip) بين الاثنين ولا يحدث فى ذات الوقت تصدع للطبقة نتيجة تأثير هذا التماسك. وتتوقف قوة التماسك على عدة عوامل منها : حالة الثقب المحفور فى الصخر لوضع القضيب ، نوعية الربط (Type of anchorage) ، نوعية وقوة طبقة الصخر ، وجود المياه الأرضية ، وغيرها . ويمكن تحديد سلوك التماسك بإجراء إختبار خلع (Pull out testing) على مسمار (Bolt) يتم وضعه داخل ثقب بالصخر ثم شده للخارج بإستخدام رافعة هيدروليكية (Hydraulic jack) ورسم منحنى الحمل - التشوه (Load deformation curve) للربط. ويمكن إجراء هذا الإختبار فى المعمل أو فى الموقع. ويوضح الشكل (١٢-٢٥) نتائج إختبارات خلع تم إجراؤها بإستخدام تصميمات ربط مختلفة (Different anchorage design) باستعمال الراتنج (Resin) كوسيلة تماسك بين القضيب والصخر.

ويمكن حساب طول الربط (Bond length) على طول السطح بين الحقين والصخر (Grout / rock interface) بإستخدام العلاقة التالية (12-9):

$$L = T_f F / \tau_{ult} \pi D \qquad (12\text{-}9)$$

حيث

L = طول الربط (متر)

T_f = الحمل الأقصى (Ultimate load) أو قوة الخلع (Pull out capacity) لعنصر التدعيم (KN)

F = معامل أمان (يتراوح بين ٢ ، ٣)

D = قطر الثقب المحفور فى الصخر لوضع عنصر التدعيم

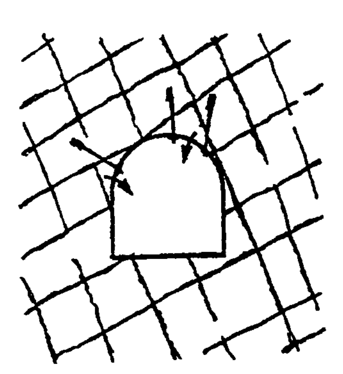
τ_{ult} = التماسك الأقصى (Ultimate load) أو الاحتكاك (Skin friction) على سطح التلامس بين الصخر والمونه (Rock / grout interface) (KN / m^2)

وفى العلاقة السابقة يتم حساب التماسك الأقصى τ_{ult} للصخور اللينة (Soft rocks) التى تقل مقاومتها (UCS) عن ٧ ميجا باسكال من إختبارات يتم إجراؤها فى الموقع. أما فى حالة الصخور القوية (Strong rocks) فيمكن اعتبار التماسك الأقصى τ_{ult} مساويا ١٠ % من قيمة مقاومة الصخر (UCS). وفى جميع الأحوال يجب ألا يزيد التماسك الأقصى τ_{ult} عن أقل الحدود التالية :

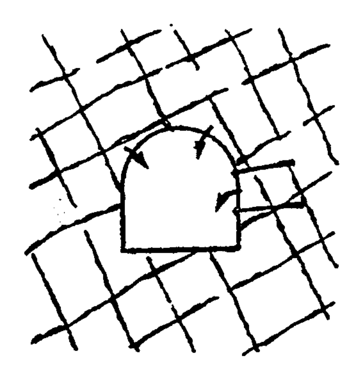
١- مقاومة القص الصغرى للصخر (Minimum shear strength).

٢- ١٠ % من مقاومة ا الحقين (UCS).

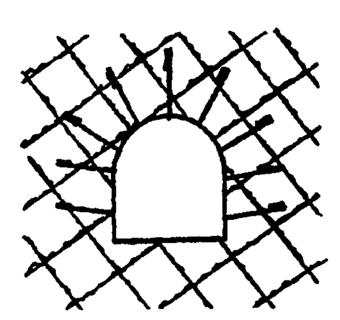
٣- مقاومة مقدارها ٤ ميجا باسكال.



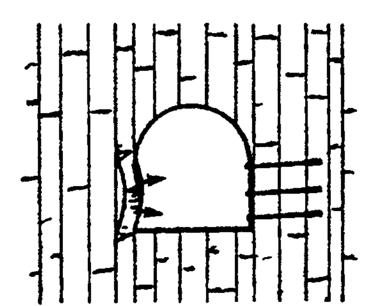
أ- تعليق الكتل المفردة



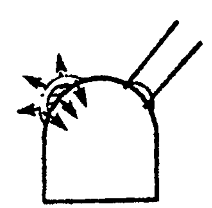
ب- زيادة المقاومة للإزاحة للكتل المفردة



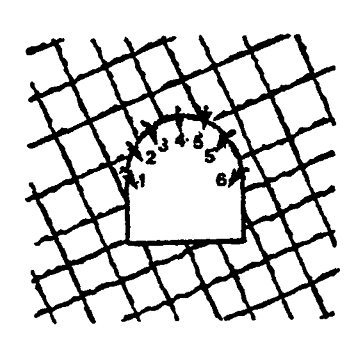
ج- تكوين كمرات (غالبا فى الصخر الطبقى)



د- منع الانهيار بانبعاج البلاطة أو أعمدة الكتل الصخرية (مع بيان تسليح الصخر لمنع الانهيار بالانبعاج)

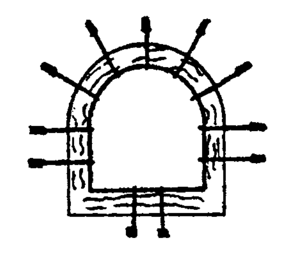


هـ- تكوين عقد أو حلقة فى الصخر المتكسر مما يزيد من درجة الثبات بتحسين التحكم فى الكتل المفردة



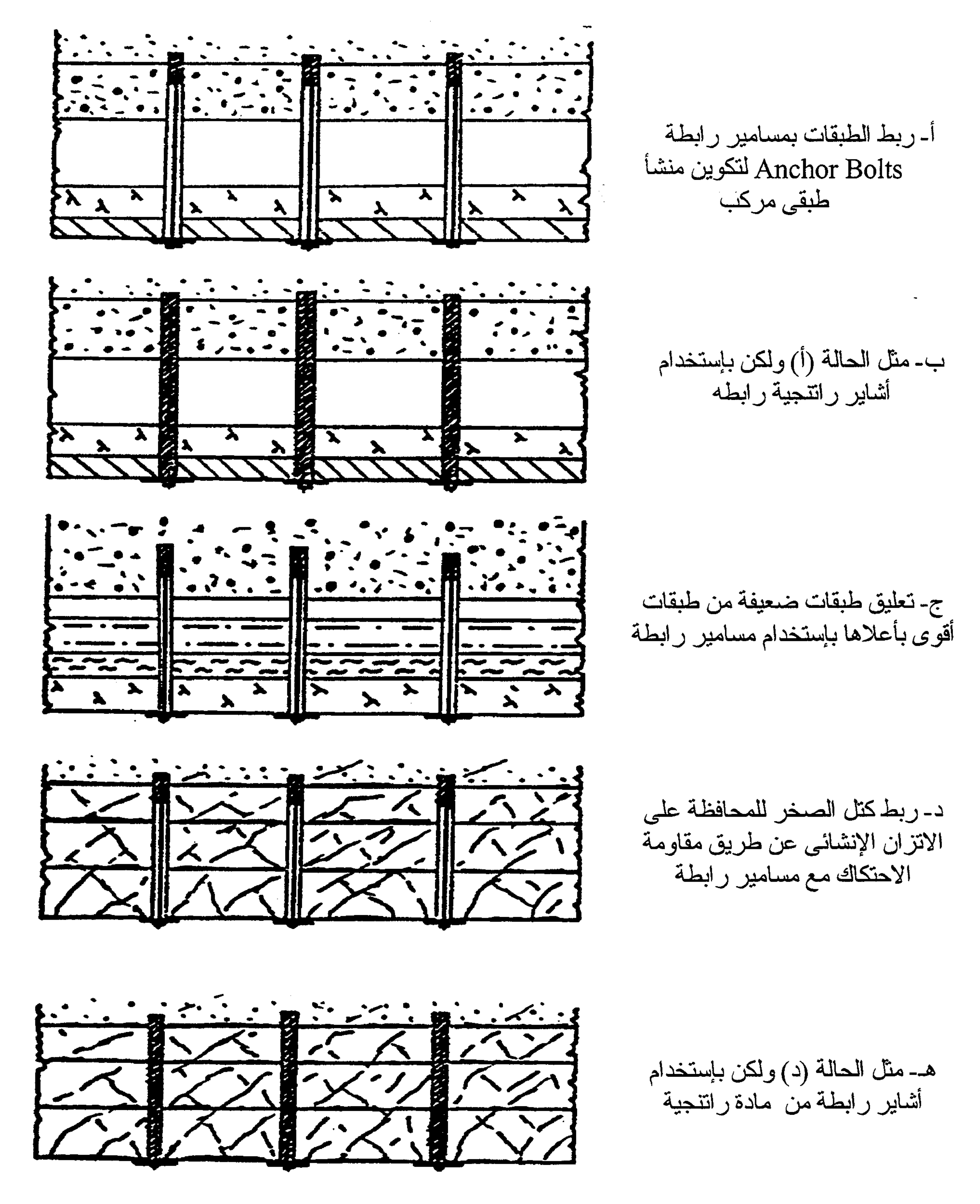
و- منع التفكك التدريجى للكتل السائبة

ز- تحديد توسع مناطق الانهيار بتوليد ضغط قطرى

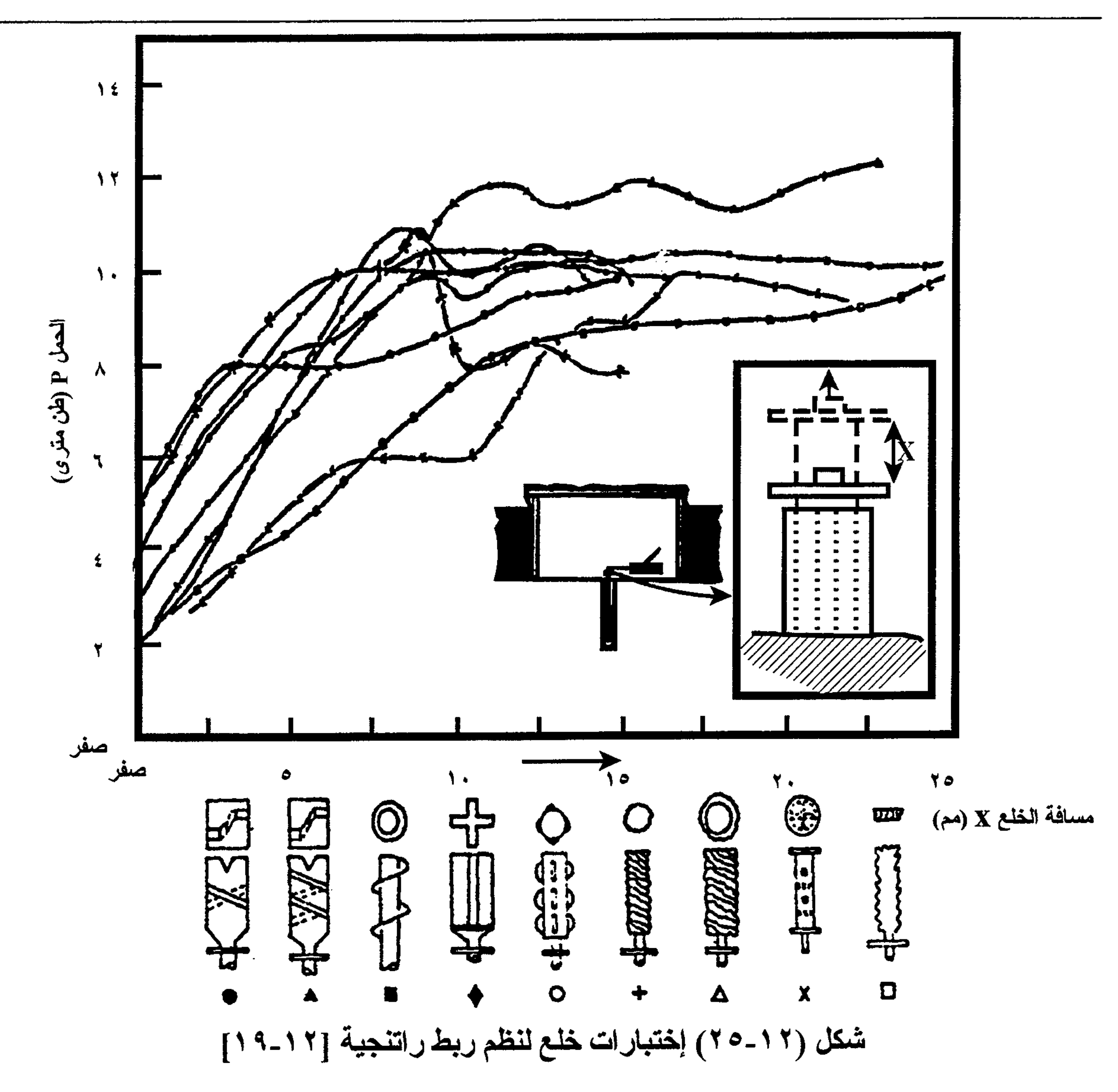


ى- التحكم فى تشكل الصخر حول محيط حفر النفق (للصخور ذات معاير التشوه المنخفض وذات معدل الزحف الزائد)

شكل (١٢-٢٣) ميكانيكية تدعيم الصخور نظريا [١٢-٢١]



شكل (١٢-٢٤) أسس تدعيم الصخر [١٢-٦٠]



شكل (١٢-٢٥) إختبارات خلع لنظم ربط راتنجية [١٢-١٩]

كما يمكن حساب طول التماسك لمسامير الصخر (Rock bolts) المثبتة بإستخدام كبسولات الراتنج (Resin capsules) بإستخدام العلاقة التالية (12-18) :

$$L = 2.5\,P + 50 \qquad (12\text{-}10)$$

حيث

L = طول التماسك (مم)

P = حمل التشغيل لعنصر التدعيم (Working load) (KN)

ويجب ألا يقل طول التماسك عن ٤٠٠ مم

ويمكن الاسترشاد بالأبعاد التالية الخاصة بلوح السطح (Face plate) المستخدم مع مسامير الصخر (Rock bolts) (12-21) .

حمل التشغيل للمسامير (KN) Working load of bolt	طول ضلع اللوح أو قطره (مم)	سمك اللوح (مم)
٨٠	١٢٥ ـ ١٥٠	٧
١٥٠	١٥٠ ـ ٢٠٠	١٠
٣٠٠	٢٠٠ ـ ٢٥٠	١٢

ويجب الاهتمام الكامل بعامل الزمن (Time) فى عملية تدعيم الصخر حيث أنه يلعب دورا هاما فى سلوك نظام التدعيم. وهناك ثلاثة أزمنة تتعلق بعملية تنفيذ التدعيم يجب أخذها فى الاعتبار :

١- التأخر الزمنى (Time lag) بين حفر النفق وتركيب (Installation) وشد (Tensioning) نظام التدعيم وهذا الزمن شديد الأهمية.
٢- The rheological character الخاص بسلوك طبقة الصخر والمؤدى إلى تأخير حدوث التشوهات (Deformations) والذى يمكن أن يكون ذا تأثير محسوس فى بعض أنواع الصخر.
٣- تقادم واضمحلال نظام التدعيم مع الزمن ذو أهمية قصوى وخاصة إذا ما كان هذا التدعيم يمثل النظام الأبتدائى للسند.

وفيما يتعلق بالتأخر الزمنى فإنه يمثل مشكلة عامة لكل نظم التدعيم والقاعدة العامة فى أى نظام لتدعيم الصخر هى أن يكون مؤثرا بمجرد تركيبه. وتلعب عملية إعادة (Restoration) اتزان القوى المؤثرة على طبقة الصخر دورا هاما فى هذا الصدد وبخاصة فيما يتعلق بمقدار واستمرارية (Magnitude and duration) تشوه الطبقة. ويحدث هذا فى نظام السند المؤقت وليس السند الأبتدائى أو الدائم حيث لا تستقر بعض أنواع الصخور إلا بعد حدوث تشوهات هامة تستغرق وقتا من الزمن.

أما فيما يتعلق بسلوك كتلة الصخر على المدى الطويل فإنه يمكن أن يتأثر بعدد من العوامل مثل التفجيرات ، التغيرات فى إجهادات التربة الإقليمية (Regional) ، ظروف المياه الجوفية أو عمليات التحات (Weathering processes) . وكل من هذه العوامل يمكن أن يؤدى إلى انهيار أو فقد فاعلية نظام تدعيم الصخر.

وتمثل عملية تركيب نظام تدعيم الصخر أهمية كبيرة لأداء عناصر نظام التدعيم ولنظام التدعيم بأكمله. ويجب أن تتم هذه العملية بإتباع معايير ومعاملات أمان محددة وتحت إشراف كفء وصارم مع الأخذ فى الاعتبار العوامل التالية :

١- زمن برم (Spinning) صحيح لمسامير الصخر (Rock bolts) التى يتم تركيبها بإستخدام حقين من مادة راتنجية (Resin grout) حيث أن زيادة أو نقص هذا البرم يؤدى إلى ربط ضعيف للبراغى (Weak bond) .
٢- يجب أن يصل التماسك (Bond) إلى مقدار مناسب قبل إجراء عملية الشد (Tensioning) .
٣- مناسبة قطر الثقب للصخر المثقوب فيه.
٤- زيادة برم (Over spinning) أداة الثقب (Drill bit) أو القضيب نفسه (Rod) يمكن أن يغير شكل الثقب (Hole profile) .
٥- يجب تنظيف الثقوب وتجفيفها إن أمكن قبل تركيب القضيب.

هذا ويجب الاهتمام بأمان القائمين بعملية تركيب المسامير حيث تتم هذه العملية غالبا فى ظل عدم تدعيم سقف النفق مما يمثل خطورة شديدة على القائمين بعملية التركيب إذا ما تم إستخدام معدات ثقب خفيفة تحمل يدويا. ولتفادى هذه الخطورة يجب إستخدام الميكنة مثل أسلوب الثقب المبرمج (Computerised drilling) وماكينات الثقب والتركيب العملاقة المتحركة (Drilling and bolting jumbos and mobile plant).

١٢-٩-٢-٢ سند التربة بإستخدام الخرسانة Concrete and Shotcrete Linings

تستخدم الخرسانة المصبوبة والخرسانة المقذوفة (Shotcrete) فى تبطين أنفاق الهندسة المدنية كسند مؤقت (Temporary) أو سند أبتدائى (Primary) أو سند نهائى (Secondary) فى جميع أنماط التربة. ويمكن تقسيم تبطين التربة بالخرسانة المصبوبة إلى تبطين عن طريق القطع (Segmental) أو تبطين بإستخدام الخرسانة المصبوبة بالموقع (Cast in situ) ويستخدم هذا التبطين كسند أبتدائى أو سند نهائى. وتستخدم الخرسانة المقذوفة كسند مؤقت للأنفاق المشقوقة فى الصخر بالاشتراك مع عناصر تدعيم الصخر (Rock bolting) وشبكة من السلك (Wire mesh).

وتعد مقاومة الخرسانة المناسبة للضغط ومعامل المرونة المرتفع لها وسهولة صبها (Castability) ووزنها النوعى المنخفض نسبيا وتكلفتها المناسبة وذلك مقارنة بالحديد الزهر (Cast iron) أو الصلب (Steel) من أهم العوامل التى تشجع على شيوع إستخدامها فى تبطين الأنفاق. كما أن متانة الخرسانة (Durability) تعد العامل الأهم فى مناسبتها لأعمال تبطين الأنفاق. ولكن بجانب هذه المميزات فإن ضعف مقاومة الخرسانة للشد يعد عاملا معاكسا فى إستخدام الخرسانة فى التبطين ويجب أن يؤخذ فى الاعتبار أثناء تصميم نظام التبطين بالخرسانة وخاصة إذا كان هذا التبطين على شكل قطع (Segments) حيث يمكن أن يؤدى ضعف مقاومة الخرسانة للشد إلى تحطم هذه القطع أثناء النقل أو أثناء التركيب. وعلى ذلك فيجب أن يتم تسليح هذه القطع بإستخدام الصلب لمقاومة التشريخ أو الانهيار للقطع نتيجة القوى المنتقلة إليها من التربة وغيرها.

أولا : سند التربة بإستخدام قطع من الخرسانة Concrete Segmental Support

يمكن تصنيف تبطين الأنفاق بإستخدام قطع الخرسانة سابقة الصب (Precast concrete segmental lining) إلى الأنماط التالية (12-38), (12-16):

١- التبطين المثبت بالمسامير والحقين (Bolted, grouted lining) : ويناسب هذا النمط غالبية أنواع التربة من التربة الرخوة إلى الصخر القوى . ولا يتأثر هذا النمط بالتفجيرات القريبة. والمجال الاعتيادى لإستخدامه يكون للأنفاق ذات الأقطار بين ١,٥٠ - ١٠,٥٠ متر بالرغم من إستخدامه لأقطار أكبر من ذلك فى حالات خاصة. وهو يناسب أعماقا حتى ٣٠ متر طبقا لطبيعة الأرض المستخدم فيها. وعادة ما يكون عرض القطعة ٠,٦٠ متر ويمكن أن يزداد إلى ٠,٧٦ متر . وتكون القطع ثقيلة التسليح لمقاومة عزوم الإنحناء المتولدة بها.

٢- التبطين الممتد (Expanded lining) : ويمتد هذا التبطين داخل النفق دون الحاجة إلى مسامير لتثبيته فى التربة كما يتضح من الشكلين (١٢-٢٦) ، (١٢-٢٧) . ويناسب هذا النوع من التبطين التربة التى ينتج عند حفر النفق بها قطاع منتظم (Accurate profile) (ويكون ذلك بإستخدام أسلوب درع الوقاية Shield) وتظل فى نفس الوقت متماسكة لزمن يسمح بإنشاء وامتداد هذا التبطين. ويؤدى هذا النمط من التبطين إلى زيادة سرعة معدل حفر النفق. ويستخدم هذا التبطين للأنفاق التى تتراوح أقطارها بين ١,٥٠ - ١٠,٥٠ متر ويستخدم بكثرة فى أنفاق السكك الحديدية وأنفاق الطرق وأنفاق المياه.

٣- التبطين ذو السطح الأملس مع الحقين(Smooth bore grouted lining) : ويستخدم هذا التبطين فى جميع أنواع التربة بدءا من الطمى الرخو (Soft silts) إلى الصخر القوى (Strong rock)

وعادة ما يستخدم لأنفاق الصرف الصحى قصيرة الطول. ولا يتطلب الأمر إستخدام تبطين نهائى (Secondary lining) مع هذا التبطين. وقد استخدم هذا التبطين لأنفاق حتى قطر ٩,٥٠ متر.

٤- التبطين الممتد مع إستخدام الحقين (Expanded, grouted lining) : ويناسب هذا النمط من التبطين التربة الصخرية الضعيفة (Weak rock) والتى يكون قطاع النفق المشقوق بها بواسطة ماكينة القطع (TBM) غير منتظم حيث يمتد التبطين داخل النفق ثم يتم ملء الفراغات بين التبطين والتربة بإستخدام الحقين.

ويستخدم حديد التسليح فى قطع الخرسانة لمقاومة إجهادات الشد الناتجة عن نقل القطع وتركيبها ودفع الدرع داخل التربة وأيضا لمقاومة الأحمال الدائمة الناتجة عن ضغط التربة على التبطين. والحد الأدنى للغطاء الخرسانى لحديد التسليح يتراوح بين ١٣ - ٢٥ مم ويرتفع إلى ٤٠ مم إذا ما كان التبطين سوف يتعرض لماء البحر أو أى عامل أخر يؤدى إلى صدأ حديد التسليح. وفى حالة التبطين المثبت بالمسامير فإن كمية حديد التسليح تكون بين ١ - ٢ % من حجم الخرسانة. ويوضح الشكل (١٢-٢٨) الأنواع الرئيسية للوصلات المستخدمة لتجميع القطع الخرسانية (12-16).

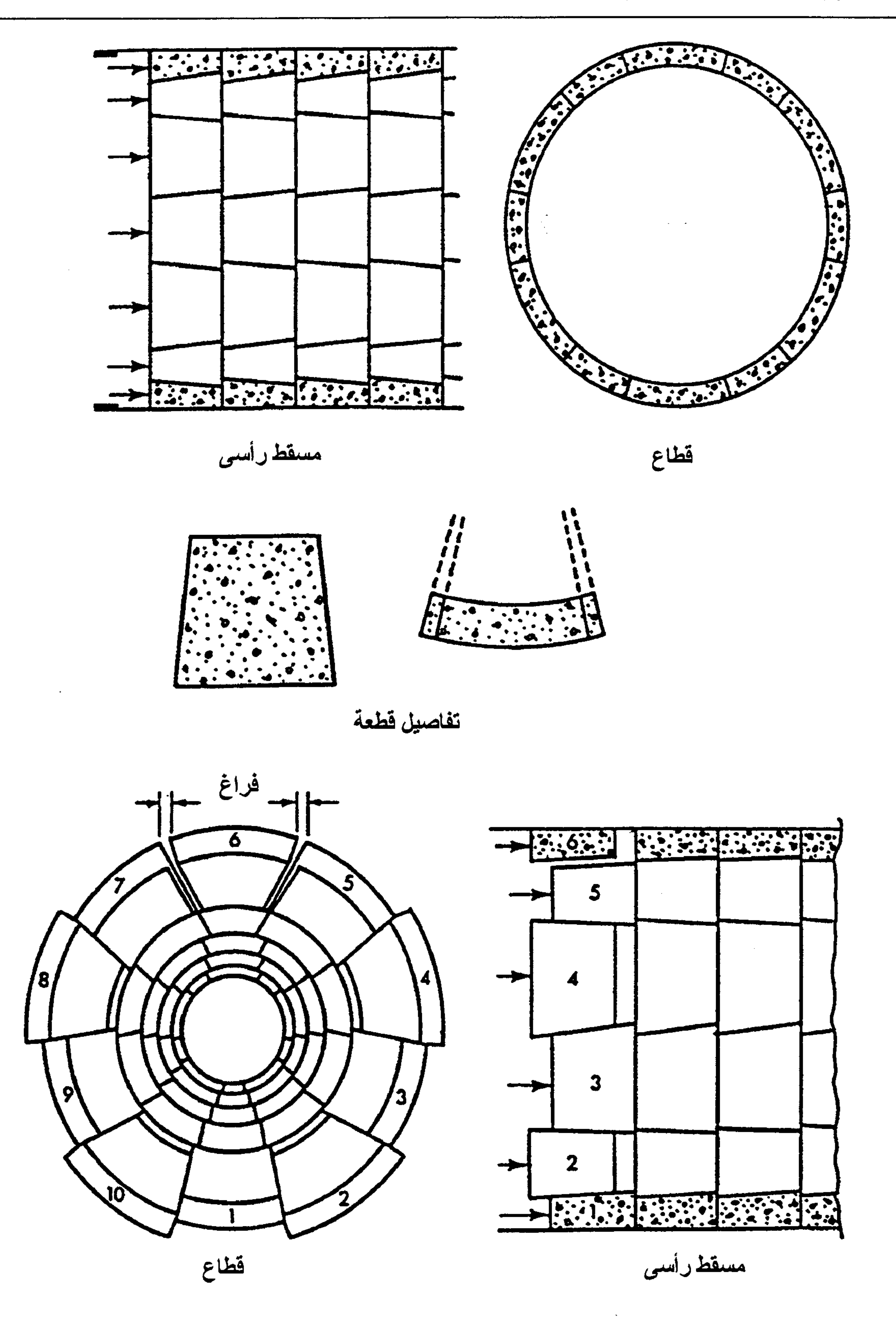
ثانيا : سند التربة بإستخدام الخرسانة المصبوبة بالموقع

Cast in Situ or Monolithic Concrete Lining

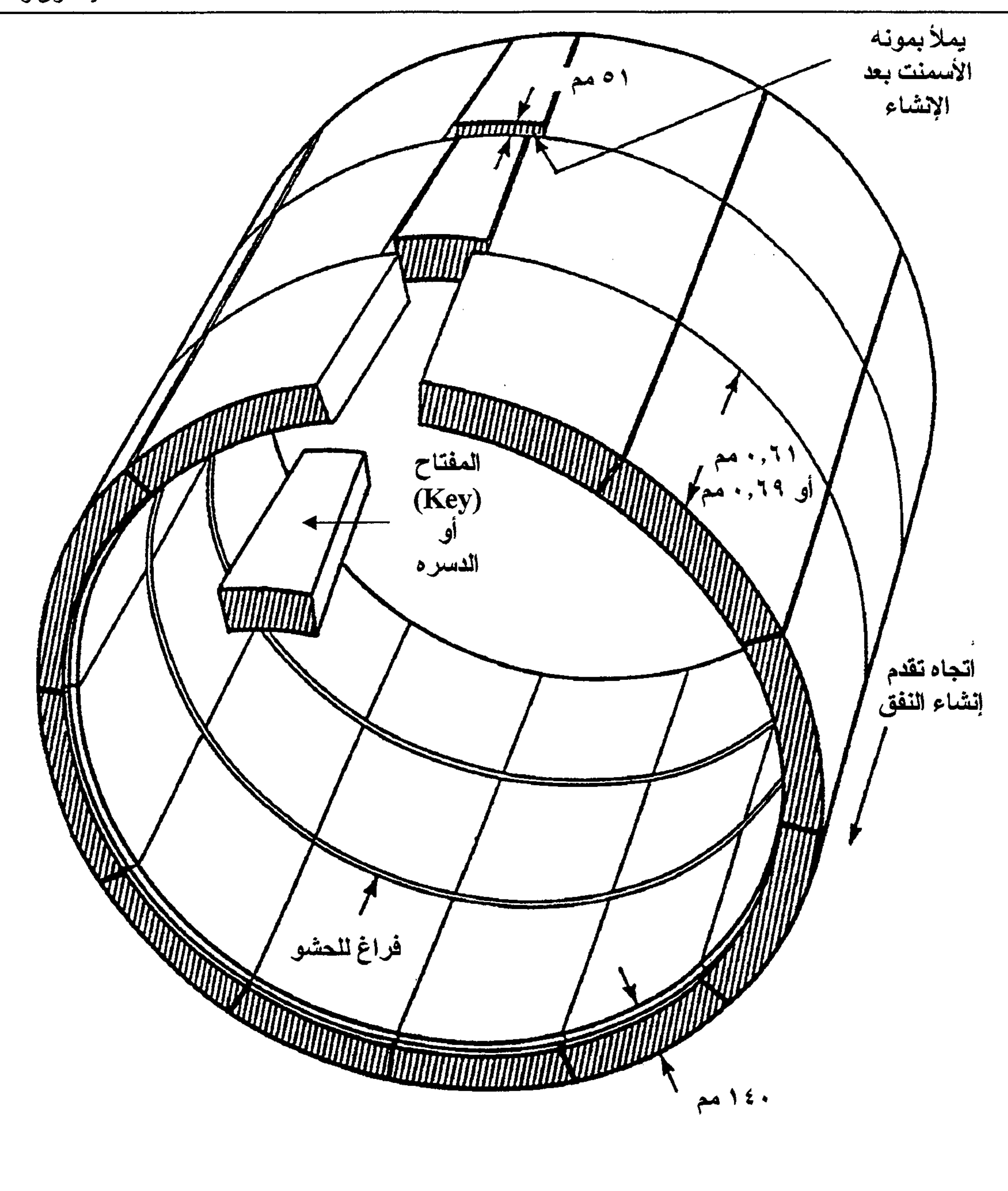
يستخدم هذا النوع من التبطين كسند أبتدائى وسند نهائى فى كل من حالتى التربة الرخوة والصخر. ويعد هذا النوع من التبطين الأكثر اقتصادا فى الحالات التى يمكن فيها حفر النفق بأكمله مع سنده مؤقتا ثم يتم صب خرسانة التبطين الأبتدائى.

ويستخدم حديد التسليح فى هذا التبطين على هيئة مجموعات من الصلب(Steel sets) تستخدم كجزء من السند المؤقت لقطاع النفق. ونادرا ما يكون هذا التسليح اقتصاديا فى الأنفاق ذات الأقطار الصغيرة والمتوسطة ولكنه يكون اقتصاديا فى الأنفاق ذات الأقطار الكبيرة. وفى الأنفاق المشقوقة على أعماق كبيرة يكون إستخدام خرسانة ذات مقاومة عالية (High strength concrete) أكثر حكمة من إستخدام خرسانة مسلحة ذات سمك كبير(12-16). ويتراوح الغطاء الخرسانى لحديد التسليح العادى المستخدم فى هذا التبطين بين ٥٠ - ٧٠ مم بينما يكون هذا الغطاء ١٥٠ مم فى حالة إستخدام حديد مقوس للتسليح (Steel arches) ويوضح الشكل (١٢-٢٩) التبطين بالخرسانة المصبوبة بالموقع والمسلح بالحديد المقوس.

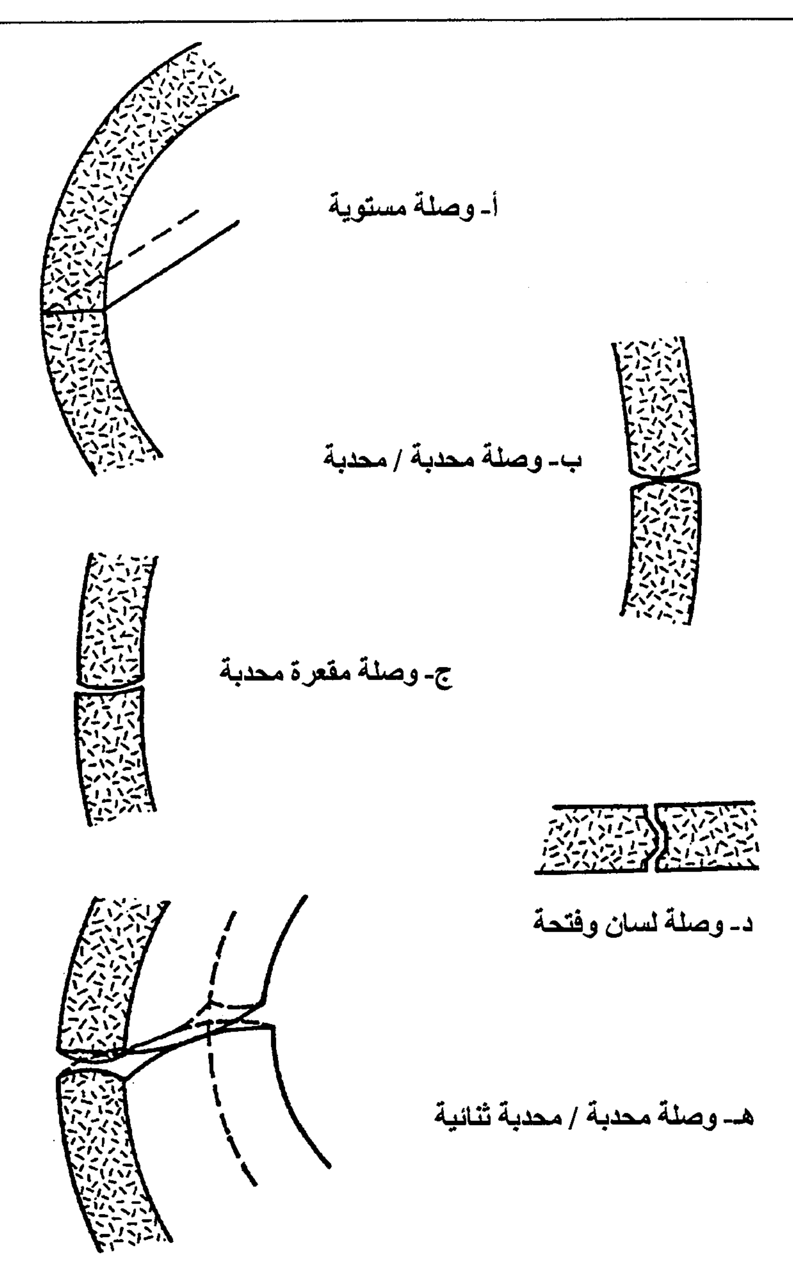
وتتوقف عملية صب الخرسانة لهذا التبطين على عدة عوامل لعل أهمها يتمثل فى ظروف التربة حيث يمكن صب التبطين ككيان واحد (Monolithic) عبارة عن قطاع مغلق أو يمكن صبه على مراحل تبدأ ببلاطة الأرضية يعقبها قوس من الخرسانة (Concrete arch) أو يبدأ ترتيب الصب عكسيا إذا لزم الأمر.



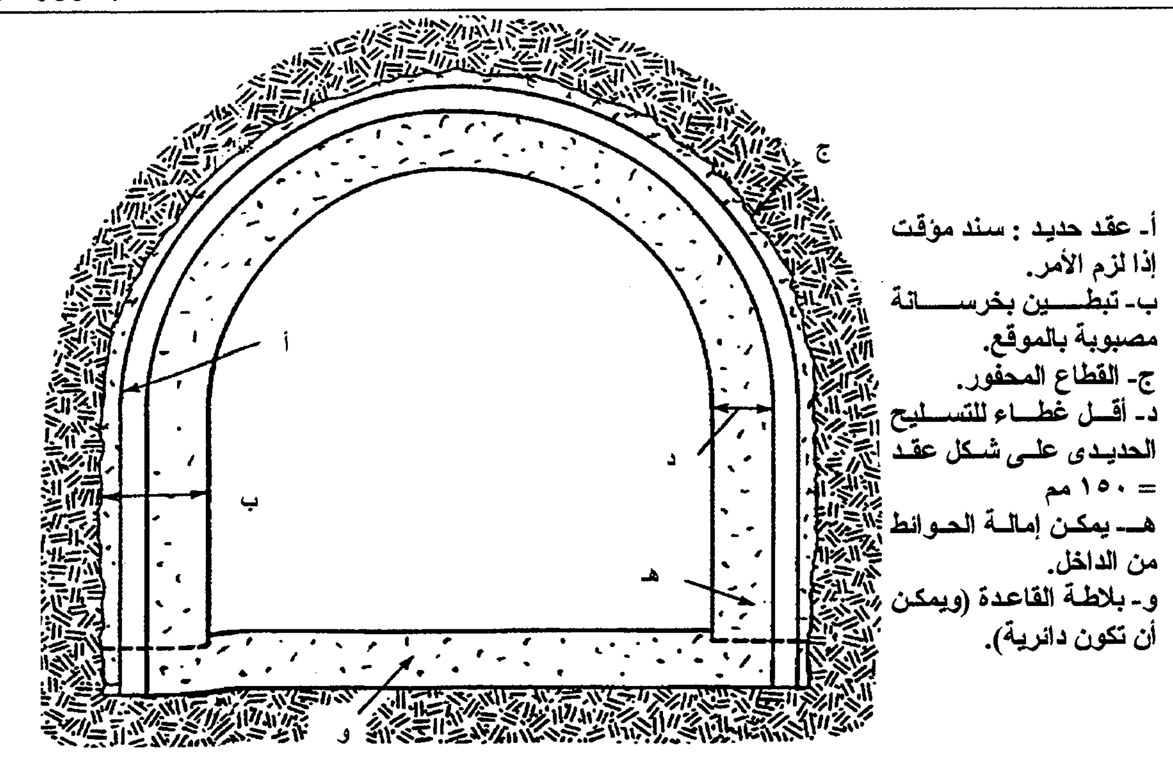
شكل (١٢-٢٦) تبطين خرسانى ممتد [١٢-١٦]



شكل (١٢-٢٧) التبطين الخرسانى الممتد بإستخدام الدسره (المفتاح) [١٢-١٦]



شكل (١٢-٢٨) أنواع الوصلات فى التبطين الخرسانى [١٢-١٦]



شكل (١٢-٢٩) قطاع نمطى فى تبطين نفق بإستخدام خرسانة مصبوبة فى الموقع [١٢-١٦]

ثالثا : عزل نظام السند الخرسانى ضد الماء

تعتبر الوصلات بين قطع الخرسانة (Segmental lining) هى المصدر الرئيسى لدخول الماء إلى النفق فى هذا النمط من التبطين ، ولذلك فإن سد هذه الوصلات (Sealing) يعد الاهتمام الأول فى عملية عزل النفق ضد الماء. ويمكن سد هذه الوصلات بإستخدام القلف (Caulking) أو المطاط أو النيوبرين (Neoprene) . وبالمثل يمكن سد ثقوب المسامير (Bolts) فى التبطين الخرسانى المثبت بالمسامير بإستخدام عازل مناسب. ولكن يجب الأخذ فى الاعتبار أن إستخدام مثل هذه المواد المذكورة من النادر أن يوفر عزلا تاما للنفق ضد الماء حيث أن حركة الوصلات يمكن أن تسبب كسر المادة العازلة كما أن مادة العزل تضمحل مع الزمن بالإضافة إلى إمكانية تولد شروخ فى التبطين نتيجة أحمال التربة الواقعة على هذا التبطين مما يتسبب عنه زيادة دخول الماء إلى النفق. ولذلك فإن الحصول على عزل تام للنفق ضد الماء يتطلب أساليب أخرى. من هذه الأساليب إستخدام غشاء من البلاستيك من طبقة واحدة (Single layer plastic membrane) يتم تثبيته بين نظام السند النهائى والخرسانة المصبوبة كنظام سند أبتدائى ويصاحب هذا الأسلوب إنشاء ممر مائى تسلكه المياه الأرضية ويتم توجيهه حيث يصب فى قناة تصريف.

رابعا : نظام السند من الخرسانة المقذوفة Shotcrete Lining

تستخدم الخرسانة المقذوفة بكثرة فى أنفاق الهندسة المدنية وهى عبارة عن خرسانة يتم قذفها تحت ضغط عال على حوائط النفق وسقفه عن طريق مضخة مما ينتج عنه دمك (Impact) لسطح التربة. وهذا التبطين يتوافق تماما مع قطاع النفق ونظريا لا توجد فراغات خلف هذا التبطين. وتستخدم الخرسانة المقذوفة فى حالة التربة المدكوكة والتربة المفككة. ففى حالة التربة المدكوكة يمثل التبطين بالخرسانة المقذوفة تبطينا مؤقتا يعمل على السيطرة على حركة التربة حتى يتم تركيب السند الإبتدائى. أما فى حالة التربة المفككة فتكون وظيفة الخرسانة المقذوفة السيطرة على التفكك الذى يمكن أن يؤدى إلى عدم

استقرار النفق. وتتراوح المقاومة المعتادة للخرسانة المقذوفة بين ٤٠ - ٥٥ ميجا باسكال ويمكن الحصول على مقاومة أعلى إذا ما لزم الأمر.

ويمكن الحصول على الخرسانة المقذوفة لغرض التبطين بأحد أسلوبين :

١- الخلط الجاف (Dry mixing) : وفيه يتم إضافة الماء إلى خليط الخرسانة الجاف عند أنف الضخ (Nozzle) وتكون نسبة الماء إلى الأسمنت فى هذا الخليط أقل من ٠,٢ وهذا هو الأسلوب المتبع الآن على نطاق واسع.
٢- الخلط الرطب (Wet mixing) : وفيه يتم الحصول على خرسانة جاهزة يتم نقلها من مركز الخلط (Plant) إلى الموقع ثم ضخها تحت ضغط عال عن طريق مضخة. وتكون نسبة الماء إلى الأسمنت فى هذا الخليط أكبر من ٠,٤٥ .

وسواء كان الخلط جافا أو رطبا فإن ذلك لا يؤثر تأثيرا هاما على المقاومة النهائية للخرسانة المقذوفة. وتوجد بعض الإضافات (Additives) التى يمكن إضافتها إلى الخرسانة المقذوفة سواء فى أسلوب الخلط الجاف أو أسلوب الخلط الرطب لتحسين عدد من خواص الخرسانة مثل :

- معجلات (Accelerators) المقاومة المبدئية للخرسانة.
- تحسين المقاومة النهائية للخرسانة.
- تحسين العزل ضد الماء (Water proofing).
- زيادة القابلية للتشغيل (Workability).
- تحسين الحماية ضد الصدأ (Corrosion protection).

ويمكن إضافة ألياف صغيرة من الصلب (Small steel fibers) إلى الخرسانة المقذوفة التقليدية للحصول على ما يطلق عليه الخرسانة المقذوفة المسلحة بألياف الصلب (Steel fiber reinforced (SFRS) shotcrete) . ويتراوح طول هذه الألياف بين ١٩ - ٣٥ مم وقطرها ٠,٥ مم. وتؤدى هذه الإضافة إلى زيادة مقاومة الإنحناء والشد للخرسانة المقذوفة.

١٢-٩-٢-٣ سند التربة بإستخدام الحديد الزهر أو الصلب

Cast Iron and Steel Supports

يعد التبطين المعدنى (metallic) من أكثر أنواع نظم سند الأنفاق إستخداما لمناسبته لجميع ظروف التربة ولكل أنواع الأنفاق. ويكون هذا التبطين المعدنى إما بإستخدام الحديد الزهر المشكل (Performed cast iron) أو من قطاعات الصلب المدرفلة (Rolled steel joist in H or U sections) . ويستخدم هذا التبطين المعدنى كنظام سند مؤقت أو نظام سند إبتدائى. ويتميز التبطين المعدنى من قطاعات الصلب بممطوليته ومقاومته العالية فى الشد والضغط مما يتيح له مقاومة عزوم إنحناء عالية ولذلك فإنه يستخدم لجميع أشكال قطاع النفق مثل الشكل الدائرى والمقوس (Arch) وحدوة الحصان (Horse shoe) والمستطيل والمربع. أما التبطين المعدنى من الحديد الزهر فيقتصر إستخدامه على القطاعات الدائرية. ويستخدم التبطين المعدنى من الصلب كسند مؤقت بالإشتراك مع خرسانة مصبوبة فى الموقع فى أنفاق الهندسة المدنية التى تتطلب سطحا أملسا أو شكلا جماليا حيث يقوم التبطين المعدنى بمقاومة التشوهات وعزوم الإنحناء التى تحدث بقطاع النفق والتى يمكن أن تؤدى إلى كسر بالتبطين الخرسانى.

أولا : تبطين الأنفاق بإستخدام الحديد الزهر المشكل

Iron Performed Tunnel Linings

الشكل العام لقطعة التبطين من الحديد الزهر (Cast iron lining segment) يكون على شكل لوح مقوس (Curved sheet) مزود بشفات (Flanges) وأعضاء تربيط عرضية (Cross members) . وتصنع هذه القطع إما من الحديد الرمادى (Grey iron) أو من الحديد ذى العقد (Nodular iron) .

ويتميز الحديد الرمادى بمقاومته العالية للضغط وأيضا مقاومته للصدأ بينما يمثل ضعف مقاومته للشد عيبا يتطلب زيادة سمك القطعة وإلى تشكيلها على هيئة حلقة مغلقة تكون معرضه فقط لقوى الضغط ويكون هذا فى الأنفاق ذات الأقطار الصغيرة. وعادة ما يتراوح معامل الأمان بين ٤ ، ١٠ عند تصميم قطع الحديد الزهر لتتحمل الإجهادات الناتجة عن نقلها وتركيبها وعن دفع درع التشييد سندا على هذه القطع. ونتيجة هذا المعامل المرتفع فإن انهيار التبطين بالحديد الرمادى يعد نادر الحدوث (12-16). ونظرا للمقاومة المرتفعة للصدأ لهذا النوع من الحديد والتى عادة ما يتم زيادتها بتغطيته بدهان بيتومينى فإنه من الشائع إستخدامه كتبطين للطبقات الحاملة للمياه.

ويتميز الحديد ذو العقد بمطابقة خواصه الميكانيكية للخواص الميكانيكية للصلب. ومقاومته للضغط أكبر قليلا من مقاومة الحديد الرمادى للضغط ولكنه يتميز عن الحديد الرمادى بأن مقاومته للشد تعادل مقاومته للضغط. وهذه المقاومة العالية للشد مقترنة مع مقاومته للصدم (Impact) وممطوليته ومعامله العالى للمرونة تجعل تشوهاته (Deflections) أقل تحت تأثير الأحمال العالية. ونتيجة هذه الخصائص الجيدة بالإضافة إلى مقاومته للصدأ فإن تكلفة هذا الحديد ذى العقد (Nodular iron) تعادل تقريبا ضعف تكلفة الحديد الرمادى ولذلك فإن إستخدام هذا الحديد يقتصر على الأحوال التى تتطلب الاستفادة الكاملة من هذه الخصائص الجيدة.

أ- أنواع التبطين بالحديد الزهر

التبطين بإستخدام المسامير والحقين Bolted, Grouted Lining

يتم تركيب التبطين فى هذا النوع بإستخدام المسامير (Bolts) فى كل من اتجاه المحيط والاتجاه المتعامد ثم يتم الردم خلف التبطين بإستخدام الحقين فى المرحلة الأخيرة لتكوين سند مباشر وملاصق للتربة. ولا يختلف سمك القطع فى هذا التبطين عند تصميمها لمقاومة الضغط إذا ما استخدم الحديد الرمادى أو الحديد ذو العقد فى تصنيع هذه القطع نظرا لتقارب مقاومة الضغط بين نوعى الحديد. أما إذا ما تم التصميم استنادا إلى إجهادات الشد فإن سمك القطاع يكون أقل فى قطاعات الحديد ذى العقد عنه فى الحديد الرمادى نظرا لضعف مقاومة الأخير للشد. وبالتالى فإن إستخدام الحديد الرمادى يكون أكثر اقتصادا فى مقاومة إجهادات الضغط بينما يكون إستخدام الحديد ذى العقد أكثر اقتصادا فى مقاومة إجهادات الشد ولكن يجب الأخذ فى الاعتبار ظاهرة الانبعاج التى يمكن أن تحدث فى القطاعات ذات السمك النحيف من الحديد ذى العقد والمعرضة لأحمال ضغط ناتج عن دفع درع التشييد (Shield) سندا على هذه القطع. وعموما فإن الحديد ذا العقد يحقق أقصى فائدة ، مقارنة بالحديد الرمادى ، عند إستخدامه فى تبطين الأنفاق ذات الأقطار الكبيرة والتى دائما ما تكون معرضة إلى عزوم إنحناء وإجهادات شد عالية.

التبطين الممتد Expanded Lining

يوضح الشكل (١٢-٣٠) تفاصيل التبطين الممتد والذى يتكون من عدة قطع (Segments) عادة من ٦ قطع تتصل ببعضها بوصلات مفصلية قطرية (Articulated knuckle radial joints) وبوصلات برغية فى اتجاه المحيط (Bolted circumferential joints) . ويؤدى هذا التصميم إلى مرونة حلقة التبطين بحيث يمكنها التشكل تحت تأثير الضغط الخارجى غير المنتظم الواقع عليها إلى أن ينتظم هذا

الضغط تحت تأثير تشكل الحلقة وتستقر الحلقة. ويعد الحديد ذو العقد أكثر ملاءمة للإستخدام فى هذا النوع من التبطين عن الحديد الرمادى والذى يمكن أن يتعرض إلى شروخ عند إستخدامه نظرا لضعف مقاومته للشد. وتعد خواص العزل الممتاز للمياه والمقاومة العالية للصدأ والوصلات المحكمة للتبطين بإستخدام الحديد الزهر ذى العقد من أهم ما يميز هذا النوع من التبطين.

ب- مجالات إستخدام التبطين بالحديد الزهر

يقتصر إستخدام التبطين بالحديد الزهر على الأنفاق ذات الأقطار المتوسطة والكبيرة استنادا إلى كفاءته فى العزل ضد المياه حيث لا يتوافر هذا العزل الجيد للتبطين الخرسانى نتيجة حدوث شروخ به إذا ما استخدم فى مثل هذه الأنفاق ذات الأقطار المتوسطة والكبيرة. ومستقبل هذا التبطين يتركز فى إستخدام النوع ذى المسامير والحقين من الحديد ذى العقد.

ثانيا : تبطين الأنفاق بإستخدام الصلب

يستخدم الصلب إستخداما واسعا فى تبطين الأشكال المختلفة لأنفاق الهندسة المدنية. ويعود هذا الإستخدام الواسع إلى الخصائص الميكانيكية الممتازة للصلب من حيث مقاومته العالية لكل من الضغط والشد ومعامل المرونة العالى بالإضافة إلى ممطوليته وسهولة درفلته وسحبه (Machining and rolling) .
ويعيب الصلب الارتفاع النسبى فى تكلفته مقارنه بالحديد الزهر إلى جانب ضعف مقاومته للصدأ مما يستلزم حمايته عن طريق الجلفنة أو الدهانات والتى تستغرق وقتا وتسبب زيادة تكلفته.

أ- أنواع التبطين بالصلب

التبطين بإستخدام المسامير Bolted Steel Lining

ويماثل فى الشكل التبطين بالحديد الزهر بإستخدام المسامير ويفضل عنه فى الحالات التالية :

١- تعرض التبطين لأحمال عالية حيث توفر المقاومة العالية للصلب قدرة أفضل على مقاومة هذه الأحمال.
٢- وجود فتحات تحتاج إلى قطع خاصة من الصلب (Special segments) فى الأنفاق المبطنة بفصوص الحديد الزهر حيث يكون أكثر اقتصادا تصنيع هذه القطع من الصلب بدلا من الحديد الزهر.

التبطين الممتد من الصلب Expanded Steel Lining

ويماثل هذا التبطين فى الشكل التبطين الممتد من الحديد الزهر والسابق ذكره.

الألواح المصفحة Liner Plates

وهى عبارة عن تبطين بفصوص رقيقة مضغوطة من الصلب (Thin pressed steel segmental lining) . وتستعمل الألواح المصفحة بنجاح بعد جلفنتها لمنع الصدأ كسند مؤقت وبالإشتراك مع تبطين من الخرسانة المصبوبة بالموقع كسند إبتدائى.

الكمرات الحديدية المدرفلة Rolled Steel Joists RSJ

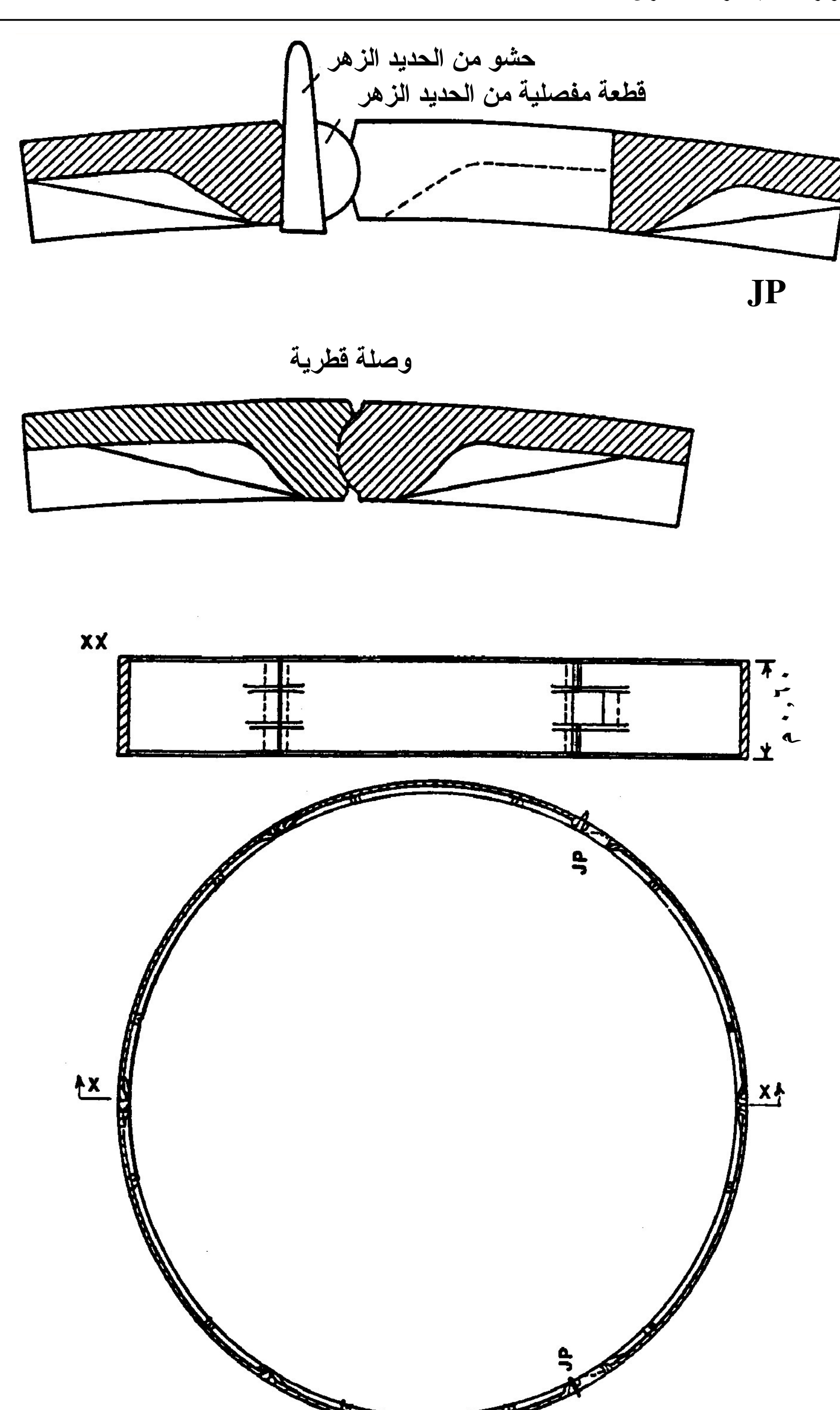
تستخدم نظم السند المكونة من الكمرات الحديدية المدرفلة بكثرة فى أنفاق الهندسة المدنية المشقوقة فى الصخر الضعيف أو المفتت (Fractured) كبديل للسند الخشبى (Timber support) حيث تتمتع هذه الكمرات بخصائص ميكانيكية ممتازة. والشكل الأكثر اعتيادا لقطاع هذه الكمرات هو قطاع H والذى يعد اشتقاقا من القطاع المعروف I . ويتميز هذا القطاع بعزم قصور ذاتى حول محوره المتعامد على الجذع (Web) يفوق عدة مرات عزم القصور الذاتى حول المحور الرئيسى الأخر فى اتجاه الجذع.

ويستخدم هذا القطاع كنظام سند مؤقت ثم يتم إحاطته (Encased) بالخرسانة المصبوبة بالموقع بعد حدوث التشوهات الابتدائية المصاحبة لعملية حفر النفق والتى يتم تحملها بنظام السند المؤقت. ويشكل هذا القطاع بحيث يمكن إستخدامه فى مختلف قطاعات النفق مثل المربع والدائرة المغلقة والقطاع المقوس حيث يعتبر هذا الأخير القطاع الأكثر شيوعا. ويوضح الشكل (١٢-٣١) تفاصيل التبطين بإستخدام هذا القطاع.

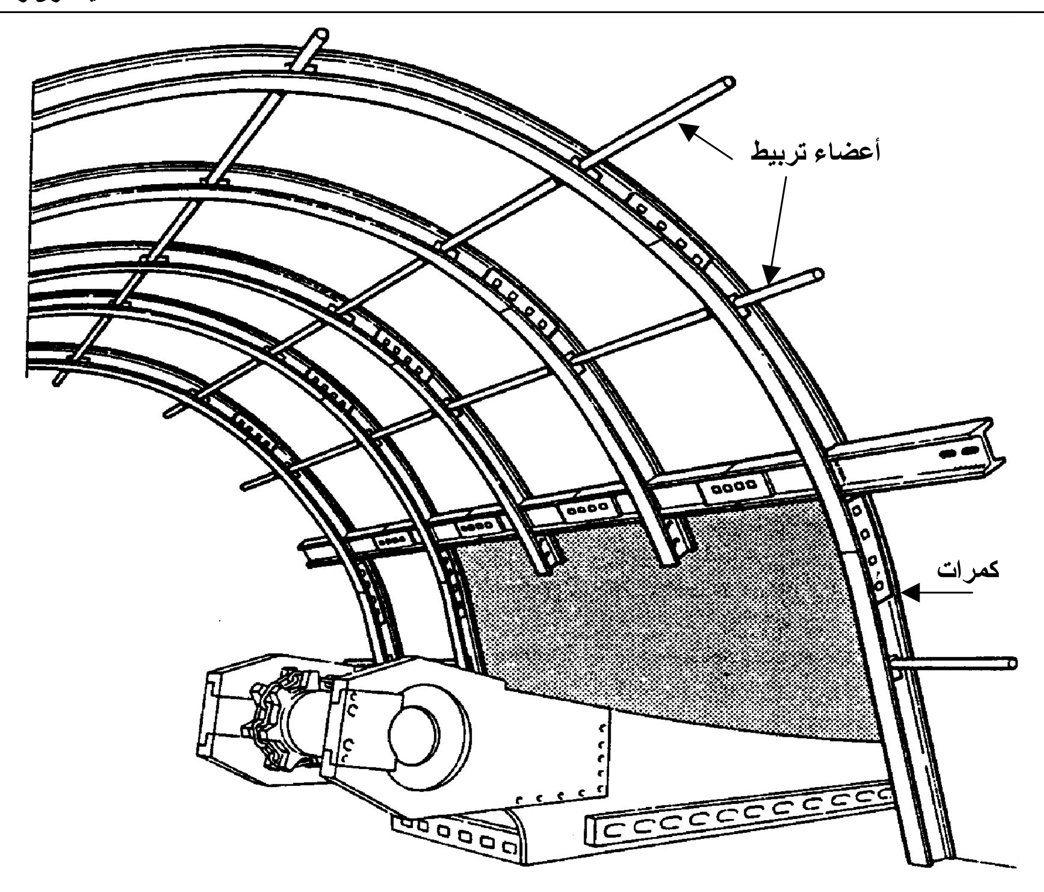
وتستخدم الوصلات الرأسية (القورة فى القورة But joints) عادة فى أنفاق الهندسة المدنية فى توصيل أطوال الكمرات الحديدية المدرفلة ذات القطاع H حيث عزوم الالتواء على نظم السند فى هذه الأنفاق تكون ذات قيمة غير محسوسة. ولعمل هذه الوصلات يتم لحام لوح طرفى (End plate) فى نهايتى كل طول من أطوال الكمرة ثم يتم وصل كل لوحين متقابلين بإستخدام مسمارين (Bolts) وفى مرحلة تالية يتم إحاطة هذه الوصلات مع باقى نظام السند بالخرسانة (Encased in concrete) . ويتم ربط الكمرات الحديدية المقوسة المتتالية بأعضاء تربيط (Struts or tie bars) كما يتضح من الشكل (١٢-٣١) حيث تؤدى هذه الأعضاء إلى تحقيق اتزان واستقرار نظام الربط. كما تستعمل هذه الأعضاء على ضبط المسافات الأفقية بين الكمرات المقوسة المتتالية (Spacers) . ويمكن أن يؤدى إستخدام هذه الأعضاء إلى زيادة مقاومة نظام السند بنسبة قد تصل إلى ٥٠ % إذا ما أحسن تصميم هذه الأعضاء. وعادة ما يتم وضع أرجل نظام السند المقوس (Arch profiled steel support system) فى بلوكات من الخرسانة المسلحة (Concrete blocks) لتوزيع الأحمال الواقعة على هذه الأرجل (Leg loads) على الأرضية ولمنع اختراق الأرجل لهذه الأرضية.

السند بإستخدام الصلب المطاوع Yielding Steel Support

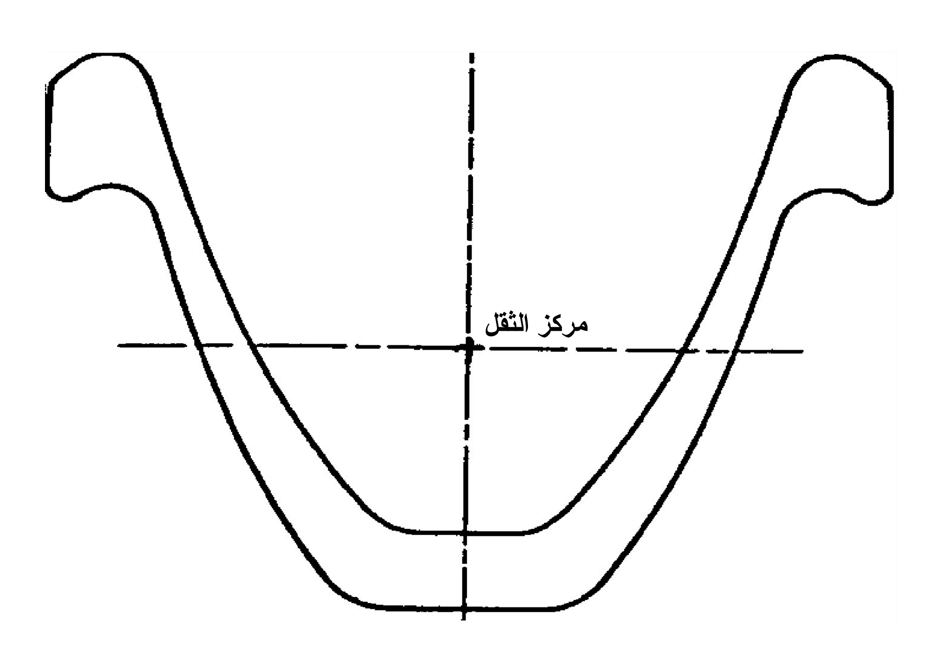
يستخدم الصلب المطاوع بقطاع على شكل V فى تشكيل نظم السند للأنفاق وبخاصة فى أنفاق المناجم التى تشق على أعماق كبيرة. ويوضح الشكل (١٢-٣٢) تفاصيل وخصائص القطاع V والذى يتميز بزيادة عزم قصوره الذاتى حول محور تماثله ليفوق عزم القصور الذاتى حول محوره الرئيسى الأخر مما يتيح له زيادة مقاومة التشوهات فى الاتجاه المتعامد على المستوى المحتوى على قوس السند (Out of plane) وذلك مقارنة بالقطاع على شكل H . وهذه الخاصية للقطاع V تؤدى حتما إلى زيادة وزن القطاع وبالتالى زيادة تكلفة نظام السند. ويمكن إستخدام الصلب المطاوع بقطاع على شكل V للعديد من بروفيلات الأنفاق (Tunnel profiles) كما يتضح من الشكل (١٢-٣٣).



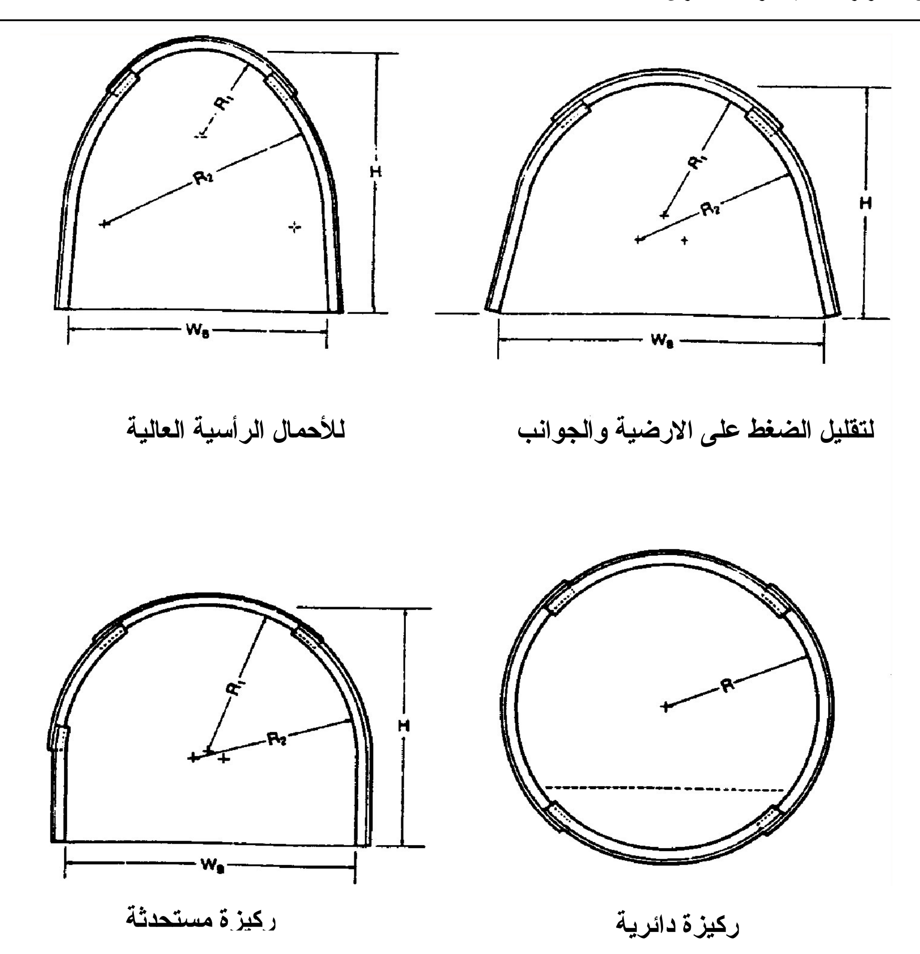
شكل (١٢-٣٠) تفاصيل التبطين الممتد من الحديد الزهر مرجع (12-59)



شكل (١٢-٣١) نظام نمطى من كمرات حديدية مدرفلة عند بداية نفق طرق مرجع (12-3)



شكل (١٢-٣٢) قطاع سند من الصلب المطاوع على شكل حرف V مرجع (12-3)



شكل (١٢-٣٣) أشكال شائعة لنظم سند أنفاق بإستخدام الصلب المطاوع مرجع (12-3)

ب- توزيع الأحمال على نظام السند الصلب

يجب الاهتمام بتوزيع الأحمال المنتقلة من قطاع الحفر إلى نظام السند من الصلب حيث أن تركز الأحمال فى بعض النقاط يؤدى إلى نقص شديد فى قوة التحمل القصوى لنظام السند (Ultimate load bearing capacity) . ويتم توزيع الأحمال إما بإستخدام قطاعات من الصلب مقطوعة بعناية لتكون مستوية بحيث توضع فى الفراغ خلف نظام السند بين قطاع الحفر ونظام السند أو بإستخدام الردم فى هذا الفراغ أو بإستخدام الأسلوبين معا.

١٢-١٠ الإجهادات والإزاحات المصاحبة لحفر النفق

يرتبط سلوك الأنفاق بالإجهادات والازاحات المصاحبة لعملية حفر النفق بل أن تخطيط مسار النفق يتأثر كثيرا بهذه الازاحات. ولذلك فإن دراسة الإجهادات والازاحات المصاحبة لحفر النفق يعد أمرا أساسيا فى تصميم الأنفاق.

١٢-١٠-١ الإجهادات فى التربة

تتغير حالة الإجهادات فى التربة تغيرا شديدا مع تغير العمق أسفل منسوب سطح الأرض والتاريخ والتركيب الجيولوجى للتربة وأيضا تشكل الصخر (Tectonic movements) . وتتسيد أحمال الجاذبية الأرضية (Gravity loads) الناتجة من وزن التربة مجال الإجهادات فى التربة القريبة من سطح

الأرض والمحيطة بالعديد من تطبيقات الهندسة المدنية. وعادة ما تحسب الإجهادات الرأسية فى هذه التربة السطحية من أحمال الجاذبية الأرضية بينما تحسب الإجهادات الأفقية بإستخدام تأثير نسبة بواسون للتربة υ (Poisson's effect) على الإجهادات الرأسية. ويعرف معامل ضغط التربة K (Earth pressure coefficient) بأنه نسبة الإجهاد الأفقى σ_h إلى الإجهاد الرأسى σ_v حيث :

$$\sigma_h = K\,\sigma_v = [\,\upsilon/(1-\upsilon)\,]\,\sigma_v \qquad (12\text{-}11)$$

وعادة ما تكون قيمة K أقل من ١,٠٠ بالرغم من إمكانية تجاوزها هذا الرقم فى حالة التربة الطينية شديدة الدمك (Over consolidated clays).

أما فى حالة الأعماق الكبيرة فى التكوينات الصخرية فإن الإجهادات فى التربة رغم زيادتها نتيجة زيادة العمق فإنها تتغير فى الصفات (Character) نتيجة تأثير التركيبات والتشكلات الصخرية. ويمكن حساب الإجهاد الرأسى σ_v عند هذه الأعماق كدالة فى العمق h بالأمتار من المعادلة التالية مرجع (11-12) :

$$\sigma_v = 0.027\,h \quad (MPa) \qquad (12\text{-}12)$$

وتتوقف نسبة الإجهاد الأفقى المتوسط (σ_h av) إلى الإجهاد الرأسى σ_v على العمق h أسفل منسوب سطح الأرض. فبينما تزيد القيمة القصوى لهذه النسبة عن ٣,٠٠ عند أعماق فى حدود ٥٠٠ متر فإن هذه النسبة تكون فى حدود ١,٠٠ عند أعماق تقترب من ١٠٠٠ متر محققة بذلك صورة الضغط الهيدروستاتيكى. وبالتالى فإن معرفة حالة الإجهادات فى مجال العمق الذى سوف يشق عنده النفق يمثل معلومة هامة وأساسية لكل من عمليتى تصميم وتنفيذ النفق.

١٢-١٠-٢ تأثير حفر النفق على الإجهادات فى التربة

يؤدى حفر النفق إلى تغيير حالة الإجهادات فى التربة القريبة منه ويتوقف هذا التغيير على حجم وشكل قطاع النفق وطبيعة الصخر المشقوق به النفق وخاصة ما يتعلق بسمات انهيار هذا الصخر (Failure characteristics) . وفى حالة ثبات حجم وشكل قطاع النفق ، كما هو الحال عادة فى أنفاق الهندسة المدنية ، فإنه من الضرورى تقدير كيفية إعادة التوزيع المرن للإجهادات فى التربة بحيث يمكن حساب الازاحات المحتملة نتيجة إعادة توزيع الإجهادات. ويمكن دراسة هذه التوزيعات والازاحات المصاحبة لها من خلال نماذج (Physical scale models) وبإستخدام التحليل المرن للإجهادات.

١٢-١٠-٢-١ توزيع الإجهادات الناتجة عن أحمال الجاذبية المصاحبة للأنفاق المحفورة بالقرب من سطح الأرض

يوضح الشكل (١٢-٣٤) نسق توزيع الإجهادات المصاحبة لنفق ذى قطاع دائرى مشقوق بالقرب من سطح الارض فى تربة رخوة بإستخدام درع التشييد (Shield) . كما يبين الشكل (١٢-٣٥) الازاحات الناتجة عن هذه الإجهادات. ويتضح من هذا الشكل الأخير أن الازاحات تكون أساسا فى الاتجاه الرأسى وتكون القيمة القصوى لها عند قمة النفق (Crown of tunnel) . ويؤدى هذا النمط من الازاحات إلى تحويل القطاع الدائرى للنفق إلى قطاع بيضاوى (Elliptical profile) .

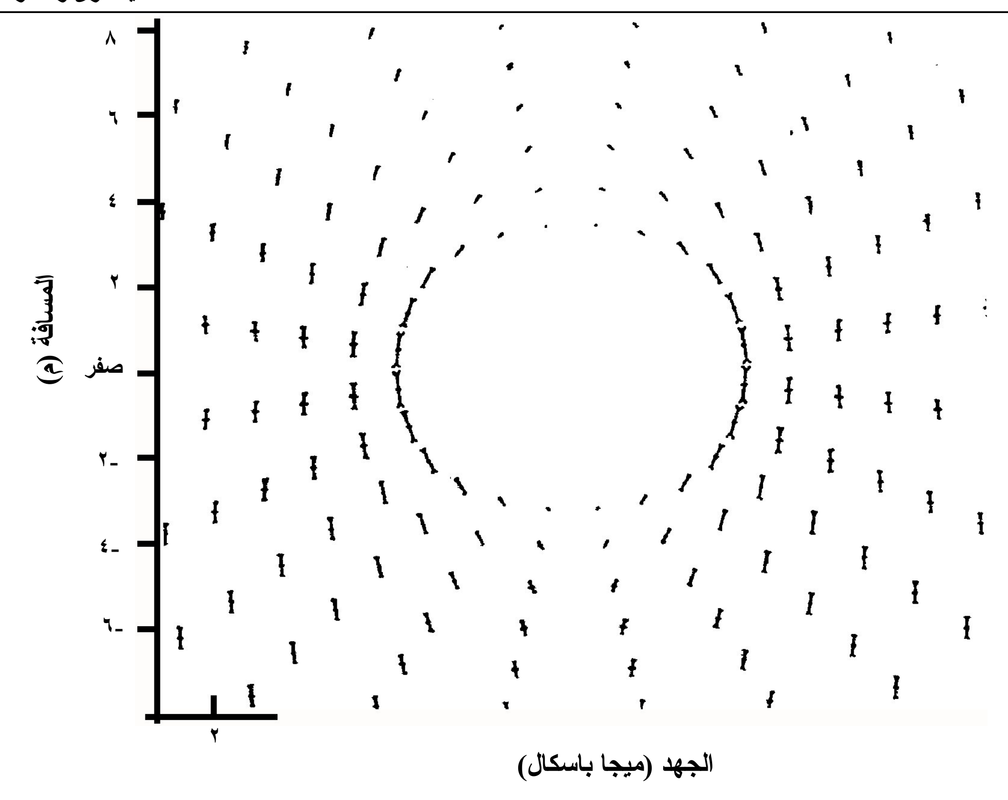
١٢-١٠-٢-٢ إعادة توزيع الإجهادات بالقرب من الأنفاق العميقة

يوضح الشكل (١٢-٣٦) إعادة توزيع الإجهادات الناتجة من التحليل المرن لنموذج نفق ذى قطاع دائرى محفور فى كتلة صخرية. ويتضح من هذا الشكل أن توزيع الإجهادات حول محيط قطاع النفق هو توزيع هيدروستاتيكى وأن القطاع الدائرى للنفق تحت هذا التوزيع مستقر. ومن هذا الشكل يمكن أيضا استنتاج أن الإختيار الأمثل لشكل قطاع النفق يؤدى إلى تساوى قيمة واتجاه الإجهادات المعاد توزيعها فى جميع النقاط حول محيط النفق.

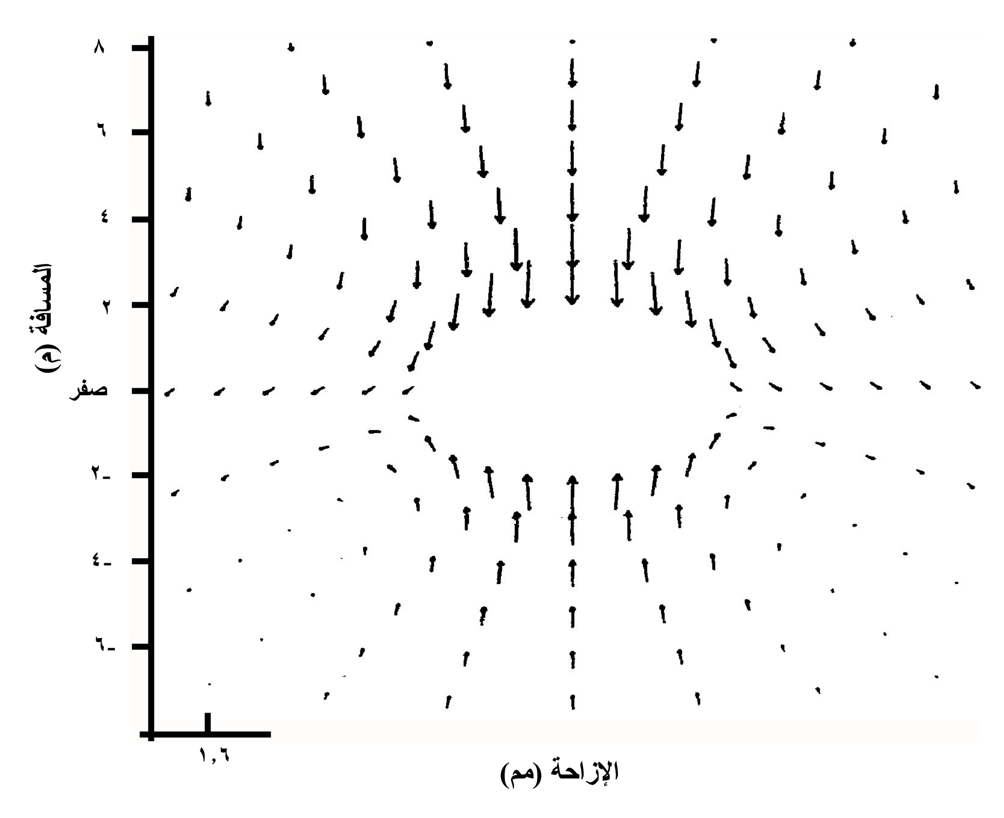
وغالبية الأنفاق تكون معرضة لتوزيع إجهادات غير هيدروستاتيكية مما يؤدى إلى اختلاف نمط إعادة توزيع الإجهادات والازاحات المصاحبة لها اختلافا جذريا عن الحالة السابق ذكرها. ويتضح هذا من دراسة نفقين أحدهما ذو قطاع مربع والأخر ذو قطاع مستطيل ارتفاعه ضعف عرضه والنموذجان معرضان لإجهاد أفقى σ_h ضعف الإجهاد الرأسى σ_v .

يلاحظ إنتشار كسور القص (Shear fractures) بين أى نقطتين بينهما اختلاف كبير فى نمط توزيع الإجهادات. وتحدث هذه الكسور نتيجة الحركة المختلفة لهاتين النقطتين. وتؤدى هذه الكسور إلى تحديد مناطق استرخاء للإجهادات (Stress relaxation) على طول الحوائط الجانبية للنفق ومناطق تركز للإجهادات عند قمة وأسفل النفق مما يؤدى إلى زيادة حركة سقف وأرضية النفق. ولكى يمكن إلغاء أو تقليل منطقة استرخاء الإجهادات وكسور القص يجب حسن إختيار أبعاد قطاع النفق. فعند إختيار ارتفاع قطاع النفق المستطيل ليكون نصف عرضه مع تعريضه لإجهاد أفقى σ_h مساويا لضعف الإجهاد الرأسى σ_v فإن ذلك يؤدى إلى تقليل كبير لمنطقة إسترخاء الضغط.

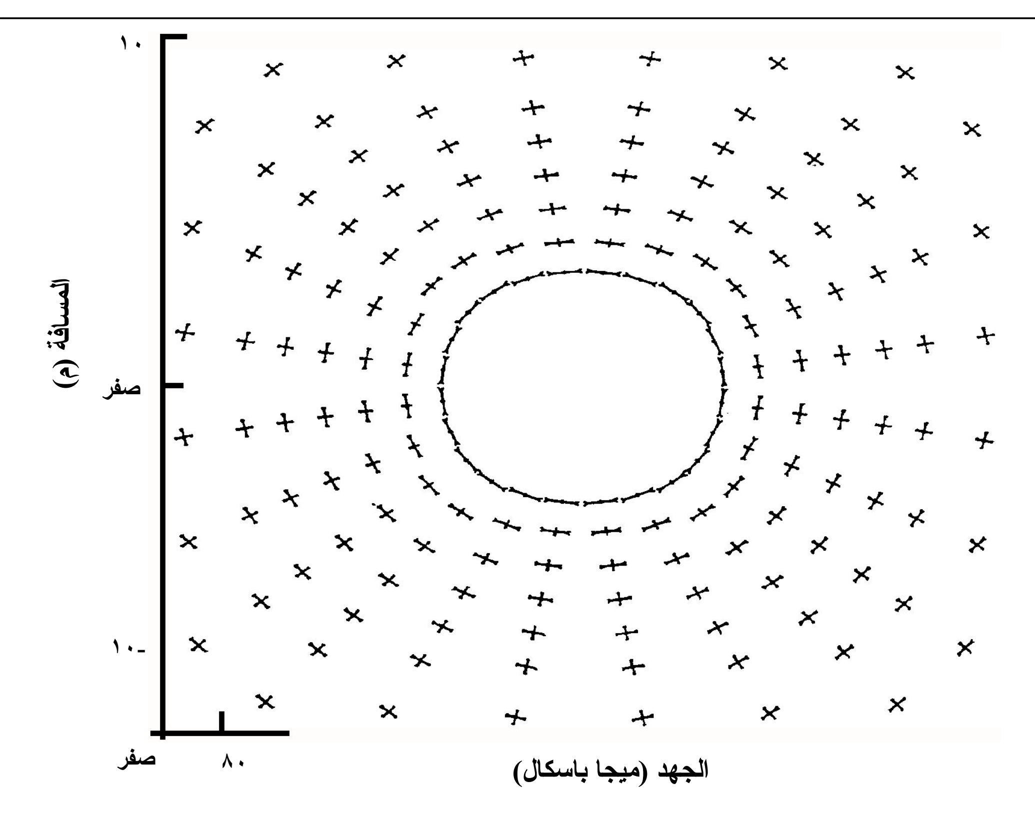
والشكل البيضاوى لقطاع النفق بدلا من الشكل المستطيل يعد إختيارا موفقا لتلافى كسور القص ومناطق استرخاء الإجهادات ولكن يعيبه مشاكل الحفر المصاحبة لهذا الشكل.



شكل (١٢-٣٤) شكل توزيع الإجهادات الرئيسية حول نفق دائرى قريب من سطح الأرض



شكل (١٢-٣٥) الازاحات فى حالة نفق دائرى قريب من سطح الأرض



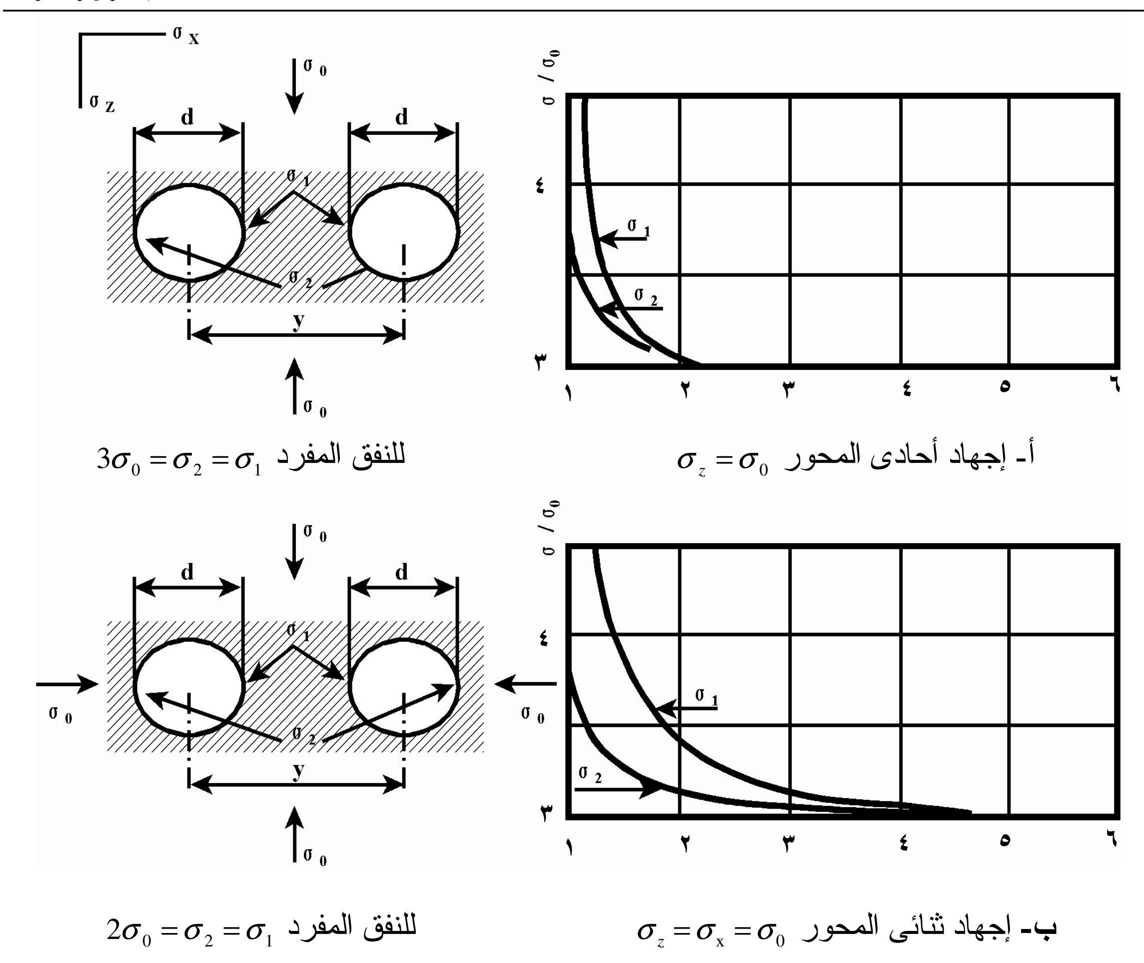
شكل (٢-٣٦) الإجهادات الرئيسية حول نفق دائرى عميق معرض لإجهادات موزعة هيدروستاتيكيا

١٢-١٠-٢-٣ انهيار كتلة الصخر والازاحات المصاحبة له

يؤدى انهيار كتلة الصخر تحت تأثير الإجهادات العالية إلى حدوث ازاحات دائمة أو لدنة فى الصخور متوسطة وضعيفة المقاومة وتكون هذه الازاحات كبيرة مقارنة بالازاحات المرنة أو المستردة (Recoverable).

١٢-١٠-٣ التداخل بين الأنفاق Interaction between Tunnels

عندما يتم حفر نفقين متوازيين متقاربين يحدث تداخل للإجهادات المتولدة عن حفرهما فى التربة مما يؤدى إلى اختلاف سلوك النفقين المتقاربين عن سلوك النفق الواحد. ويتوقف التداخل بين الإجهادات فى الأنفاق المتجاورة على التباعد بين هذه الأنفاق ويتضح ذلك من الشكل (١٢-٣٧) والذى يوضح التداخل بين نفقين دائريين متوازيين متساويين فى القطر ومحفورين فى صخر مرن كثيف (Massive elastic rock) . ففى حالة وجود إجهاد رأسى أحادى (Uniaxial state of stress) فإن تباعد القطاعين لمسافة مساوية لضعف القطر (من المركز إلى المركز) يؤدى إلى تقليل التداخل بين الإجهادات لحد كبير بينما يجب أن يكون هذا التباعد فى حدود من ٣ - ٤ مرات قطر النفق فى حالة التوزيع الهيدروستاتيكى للإجهادات حتى يمكن إهمال التداخل بين الإجهادات.



للنفق المفرد $2\sigma_0 = \sigma_2 = \sigma_1$

ب- إجهاد ثنائى المحور $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_0$

شكل (١٢-٣٧) تداخل الإجهادات بين نفقين دائريين مشقوقين فى صخر مرن كثيف

١٢-١١ تصميم الأنفاق

١٢-١١-١ اعتبارات تصميم أنفاق الهندسة المدنية

يتم حفر أنفاق الهندسة المدنية على أعماق قليلة الغور نسبيا (Shallow) مقارنة بأنفاق المناجم. ويتم حفر هذه الأنفاق فى ظروف مختلفة للارض تتراوح بين التربة الرخوة والصخر. على أن أبعاد وتفاصيل نظم التبطين (Lining) لأنفاق الهندسة المدنية نادرا ما تتوقف فقط على اعتبارات التربة وعلى الأحمال والتشوهات الواقعة على التبطين ، ولكن توجد عوامل أخرى تؤثر على تصميم نظم التبطين لهذه الأنفاق مثل :

١- الماء : إذا ما وجب أن يقاوم التبطين ضغط الماء الهيدروستاتيكى سواء من خارج النفق أو من داخله فإن هذا الضغط سوف يتحكم فى تصميم التبطين وفى الحكم على نجاح تنفيذ النفق. ففى حالة الأنفاق المعرضة لضغط ماء داخلى مرتفع فإنه لا يسمح بحدوث تسرب لهذا الماء نتيجة لما يسببه هذا التسرب من كوارث على البيئة المحيطة. وفى هذه الحالة يجب تصميم النفق بحيث يكون غير منفذ للماء وذلك بإستخدام تبطين من الصلب المدعم بالخرسانة. وفى حالات ضغط الماء الأقل فإن عملية زيادة معامل كثافة الصخر (Modulus of the rock mass) إما عن طريق تدعيم الصخر لزيادة مقاومته للضغط الداخلى للماء أو عن طريق حقن خرسانة تحت ضغط (Pressure grouting)

خلـف التبطـين الخرسـانى للـنفق لـزيادة الضـغط الخارجـى المعـاكس للضـغط الداخلـى للمـاء يمـثلان أسلوبين ناجحين فى منع تشقق التبطين وتسرب المياه.

٢- طريقة تشييد التبطين (Constructability) : ويقصد بها العلاقة المتبادلة بين نظام تبطين النفق وطريقة حفر النفق. ففى حالة التربة الرخوة والتى سوف يستخدم فيها درع الوقاية (Shield) فإن التبطين بإستخدام قطع (Segmental lining) يكون مناسبا. أما فى حالة التربة المستقرة بدون سند لفتـرة زمنـية مناسـبة تسـمح بالاسـتغناء عـن درع الـوقاية يكـون إسـتخدام الخرسـانة المقذوفـة (Shotcrete) كسند مؤقت يتبعه إستخدام خرسانة مصبوبة بالموقع أو سابقة الصب كتبطين إبتدائى هو الحل الأمثل. وقد تتحكم طريقة تشييد التبطين فى تحديد أبعاد وقطاعات وأيضا نوعية التبطين المطلوب إستخدامها.

٣- استعمال النفق : تؤثر نوعية إستخدام النفق على إختيار وتصميم التبطين لهذا النفق. فأنفاق المياه على سبيل المثال تتطلب تبطينا ذا خصائص هيدروليكية عالية مما يؤدى إلى إختيار تبطين ناعم وأيضا أنفاق الطرق وأنفاق المشاة تتطلب تشطيبا متينا وجماليا فى نفس الوقت مما يتطلب تبطينها نهائيا.

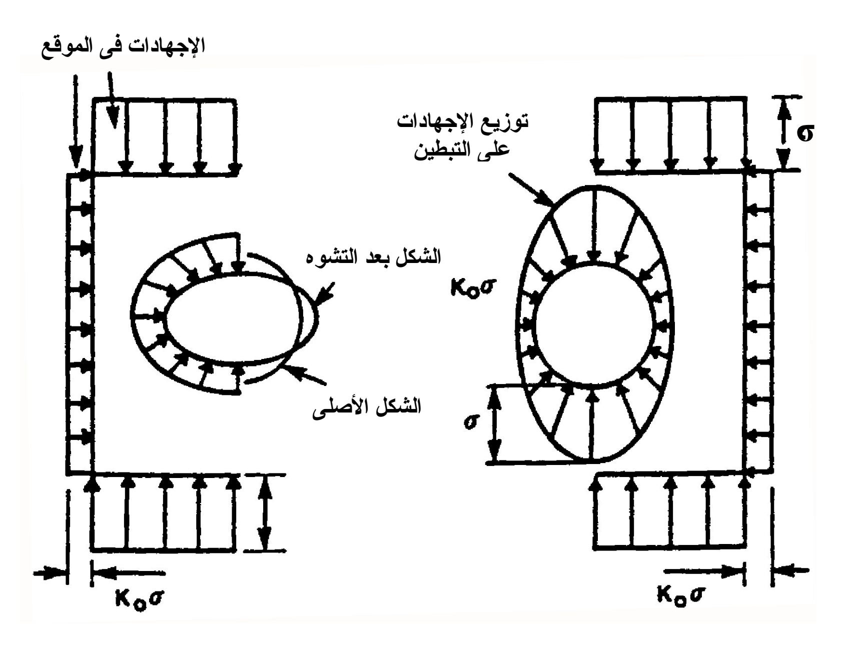
وبذلك فإنه من الواضح أن نوعية وأبعاد تبطين النفق فى غالبية أنفاق الهندسة المدنية تختار بناء على العوامل السابق ذكرها قبل أى اعتبار لظروف التربة المحيطة. ولا يعنى هذا أن تصميم التبطين لا يرتبط بسلوك التربة المتوقع والأحمال والتشوهات الواقعة على هذا التبطين نتيجة هذا السلوك حيث يمثل هذا عنصرا أساسيا فى التصميم ولكن فلسفة ومنطقية تصميم التبطين تقتضى فحص المشاكل العامة التى تصادف هذا التصميم ومحاولة علاجها.

والمشكلة الأولى تتمثل فى أنه لا يمكن تصميم تبطين النفق باعتباره منشأ معرضا لأحمال محددة القيمة حيث أنه لا يوجد يقين مطلق بحقيقة السلوك الفعلى للتربة عقب حفر النفق. وبالتالى فإنه يجب ربط سلوك المنشأ بسلوك التربة. ويمكن تشبيه سلوك تبطين النفق ببالون (Balloon) تم تحميله حيث تؤدى التشوهات الداخلية (Inward deformation) إلى تشوهات خارجية (Partial outward deformations) فى أماكن أخرى حول محيطه كما يتضح من الشكل (١٢-٣٨). وهذا السلوك يؤدى إلى إزكاء الضغط السلبى للتربة المحيطة (Passive earth pressure) لمقاومة حدوث التشوه الخارجى للتبطين وذلك عندما لا توجد فراغات بين سطحى التبطين والتربة المحيطة. ولذلك فإنه من الضرورى إجراء حقن فعال بين التبطين والتربة حول محيط النفق للاستفادة من هذه الظاهرة.

ويكون توزيع الإجهادات أكثر انتظاما على التبطين المرن (Flexible lining) عنه على التبطين الجاسئ (Rigid) (كما يتضح من الشكل ١٢-٣٨) وهذا يؤدى بدوره إلى تقليل عزوم الإنحناء المتولدة فى التبطين. وهذا ينطبق فقط على التبطين المغلق (Closed support) مثل القطاعات الدائرية والقطع الناقص (Elliptical) وليس على التبطين المفتوح (Open support) مثل القطاعات المقوسة. وعموما فإنه من الضرورى أن يتمتع التبطين بقدر من المرونة حيث أنه فى حالة التبطين تام الجساءة. لا يتولد ضغط تربة سلبى مما ينتج عنه توزيع غير منتظم للإجهادات على التبطين وهذا يؤدى بدوره إلى تولد عزوم إنحناء عالية .

وتؤثر كل من الكزازة المحورية (Axial stiffness) وكزازة الإنحناء (Flexure stiffness) للتبطين فى توليد الضغط السلبى للتربة. وتعتبر الأولى أكثر أهمية من الثانية فى هذا الصدد حيث تؤدى زيادتها إلى تحسين كفاءة خاصية الانتفاخ تحت تأثير الضغط (Compressive bulging action) . ويجب الأخذ فى الاعتبار عند تصميم تبطين النفق أن انهيار التبطين لا ينتج عن الإجهادات المتولدة به ولكن عن التشوهات (Deformations) التى تحدث له (12-32). ولذلك فإن الأولوية عند تصميم التبطين يجب أن

تتجه إلى حساب مقدار التشوهات المتوقع حدوثها به ومدى تأثير هذا على استقرار التبطين Stability). ولكن لا شك أن تحليل التشوهات يتطلب حساب الإجهادات فى كل من التبطين والتربة حيث يعتمد كل منهما على الأخر وتؤدى دقة حساب أحدهما إلى دقة حساب الأخر.



k_0 = معامل ضغط التربة الأفقى فى حالة السكون

ب- تبطين جاسئ　　　　أ- تبطين مرن

شـكل (١٢-٣٨) توزيع الإجهادات وأشكال التشوهات لتبطينين دائريين أحدهما مرن والأخر جاسئ مرجع (12-44)

١٢-١١-٢ طرق التصميم

توجد ثلاثة طرق مختلفة يمكن إستخدامها فى تصميم الأنفاق :

١٢-١١-٢-١ الطرق التحليلية

ويقصد بها الطرق التى تؤدى إلى حلول محددة (Closed form or pseudo closed form solutions) . وفى مجال الأنفاق فإن إستخدام هذه الطرق يكون خاضعا لمجموعة من الإفتراضات الاضطرارية تتعلق بجميع مجالات المشكلة وخاصة سلوك التربة. ونتيجة لذلك فإنه من الصعب تطبيق نتائج هذه الطرق مباشرة على الطبيعة ولابد من توافر قدر كبير من التقدير الموضوعى لهذه النتائج. ولكن رغم ذلك فإن نتائج الطرق التحليلية تكون مفيدة فى تدعيم نتائج طرق التصميم الأكثر دقة كما أنها وسيلة لتقييم تأثير تغير العوامل المختلفة المتعلقة بالنفق على التصميم وبذلك يمكن تحديد العوامل الرئيسية والعوامل الثانوية المؤثرة فى تصميم النفق. وقد استخدمت الطرق التحليلية بنجاح فى إيجاد حلول للمجالات التالية عند تصميم الأنفاق :

- توزيع الإجهادات والازاحات المرنة فى التربة أو الصخر المحيط بالحفر وأيضا الضغوط وعزوم الإنحناء فى تبطين النفق وذلك للأنفاق ذات الأشكال الهندسية البسيطة.

- تحديد مدى وشكل توزيع الإجهادات والازاحات فى المناطق المنهارة أو اللدنة حول الفتحات الدائرية ويتضح مما سبق اقتصار إستخدام الطرق التحليلية فى مجال الأنفاق على الأشكال الهندسية البسيطة والمتماثلة.

١٢-١١-٢-٢ الطرق الحسابية والعددية

تتميز هذه الطرق بإفتراض علاقات أكثر واقعية بين العوامل المختلفة الخاصة بالمنشأ المراد تصميمه. وتوجد رتبتان رئيسيتان للحل العددى لنظام سند الأنفاق يمكن تصنيفهما فيما يلى :

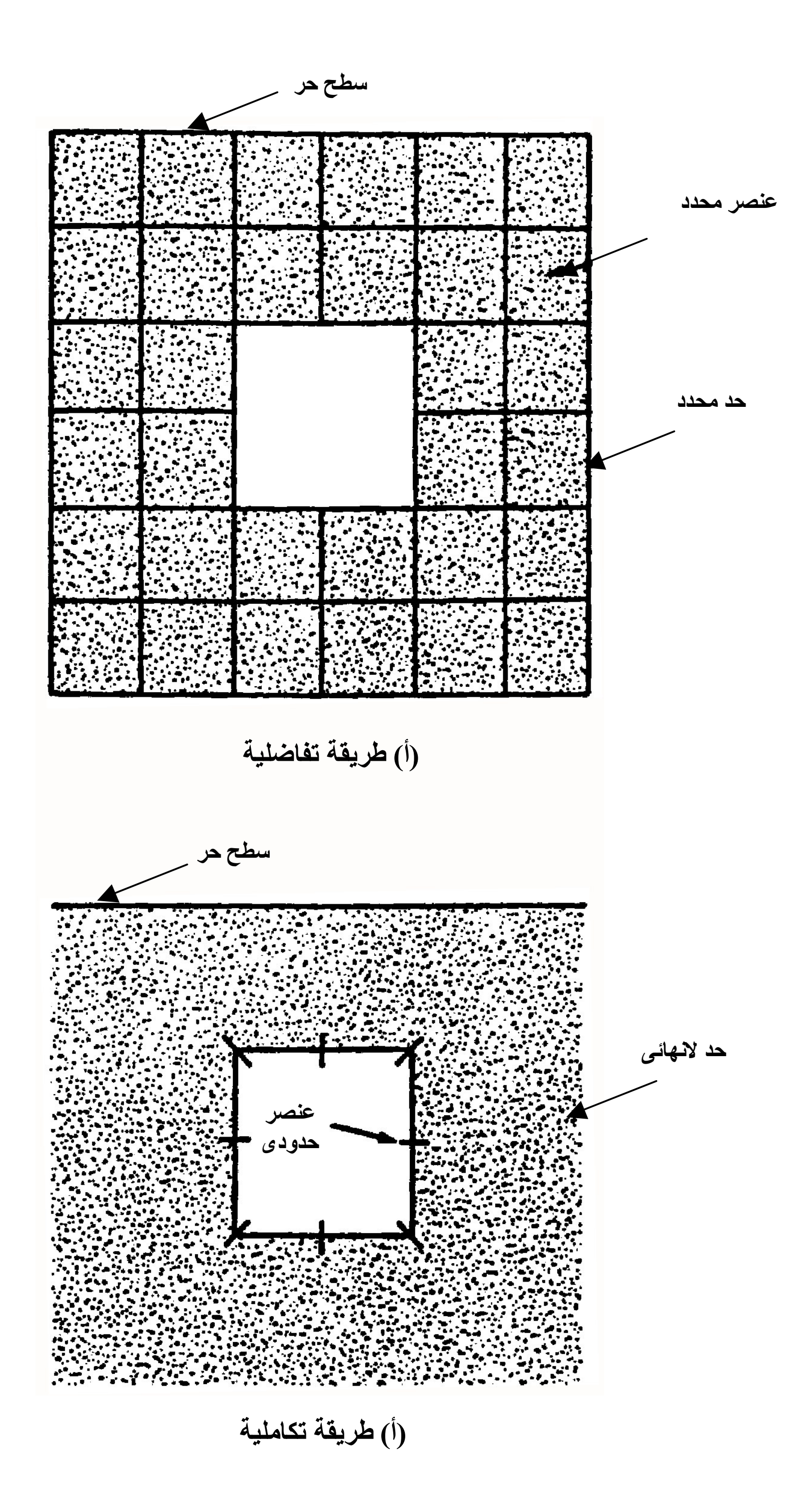
- الطرق التفاضلية (Differential methods) مثل طريقة العناصر المحددة كما يتضح من الشكل (١٢-٣٩).
- الطرق التكاملية (Integral methods) مثل طريقة عنصر الحدود (Boundary element method) كما فى الشكل (١٢-٣٩).
- الطرق المختلطة (Hybrid methods) وهذه الطرق هى خليط بين الطرق التفاضلية والطرق التكاملية وهى طرق ذات كفاءة عالية فى بعض التطبيقات. ومن أمثلة هذه الطرق طريقة العناصر المميزة (Distinct element method) .

١٢-١١-٢-٣ الطرق التجريبية (Empirical Methods)

ويقصد بها الطرق القائمة على ملاحظات أو قياسات تم تجميعها من نماذج أصلية أو من خبرات فى مشروعات سابقة.

١٢-١١-٣ تصميم الأنفاق فى التربة الرخوة

يطلق لفظ التربة الرخوة على أى تكوين عند أو قريب من سطح الأرض ويشتمل على مجال واسع من التصنيف بدءا من التربة المفككة (Cohesionless soil) مثل الرمل الجاف والزلط إلى التربة المتماسكة مثل الطين المدموك كما يتضمن هذا التصنيف الطين الصخرى (Boulder clays) . ويختلف تصميم الأنفاق فى التربة عنه فى الصخر نظرا لاختلاف طبيعة التربة ومدى الأعماق التى تنفذ فيها الأنفاق وحالة الإجهادات عند هذه الأعماق. كما أن تأثير المياه الأرضية على استقرار النفق يعد عاملا هاما فى حالة التربة فى حين أنه لا يمثل أهمية فى حالة الأنفاق المحفوره فى الصخر. لذلك فإن من الضرورى التمييز بين تصميم الأنفاق فى كل من التربة الرخوة والصخر.



شكل (١٢-٣٩) طرق تفاضلية وتكاملية للتحليل العددى مرجع (12-10)

١٢-١١-٣-١ تصميم تبطين الأنفاق لمقاومة أحمال الدرع

من المعروف أن تبطين النفق يستخدم كقاعدة مستقرة يتم الارتكاز عليها لدفع درع الحفر إلى الأمام. وتعد هذه الوظيفة للتبطين أهم من سـند التربة تحت تأثير أحمال الأرض. ويمكن إستخدام معادلات تقريبية (12-56) لحساب قدرة الروافع المطلوبة لدفع الدرع إلى الأمام حيث تساوى هذه القدرة مجموع المركبات التالية :

W_1 = مقاومة نتيجة الاحتكاك الخارجى بين جسم الدرع والتربة المحيطة به
W_2 = مقاومة نتيجة الاحتكاك الداخلى بين ذيل الدرع وقطع التبطين داخل هذا الذيل
W_3 = المقاومة السالبة للتربة نتيجة السطح المتوغل من حافة القطع
W_4 = مقاومة الوجه الحر (Free face) والتى تعتمد على طريقة تنفيذ ومساحة دعامة هذا الوجه (Face support)

ويمكن حساب القيمة التقريبية لكل من هذه المركبات من المعادلات التالية وبالاستعانة بالشكل (١٢-٤٠).

$$W_1 = [\,(P_h + P_v)\,L\,\pi \frac{D}{2} + G_p\,]\,f_1 \qquad (12\text{-}13)$$

حيث
P_v = الضغط الرأسى
P_h = الضغط الأفقى
G_p = وزن الدرع
f_1 = معامل الاحتكاك بين جسم الدرع والتربة المحيطة به
L = طول الدرع
D = قطر الدرع

$$W_2 = f_2\,Q_t \qquad (12\text{-}14)$$

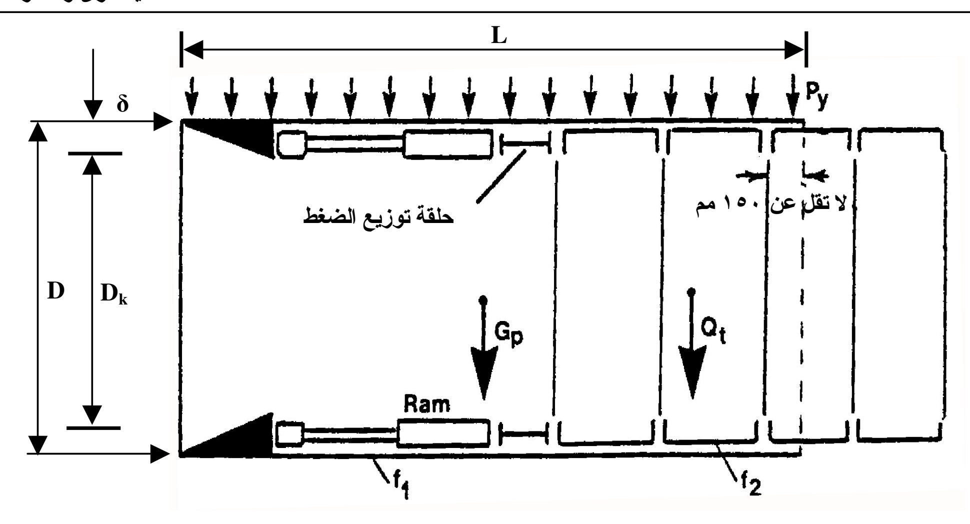
حيث
f_2 = معامل الاحتكاك بين ذيل الدرع وقطع التبطين
Q_t = الوزن الكلى لقطع التبطين المشيدة فى ذيل الدرع

$$W_3 = \pi\,D_k\,\delta\,P_v\,\lambda_p \qquad (12\text{-}15)$$

حيث
D_k = قطر الدرع المقاس من محور (Center line) حافة القطع
δ = سمك حافة القطع
λ_p = معامل المقاومة السالبة للتربة

$$W_4 = P_v\,\lambda\,F \qquad (12\text{-}16)$$

حيث
F = مساحة الوجه الحر المدعمة بـ Bulkhead أو بأعضاء تربيط Bracing
λ = نسبة الضغط الرأسى إلى الضغط الأفقى وتتراوح بين معاملات الضغط الإيجابى والضغط السلبى للتربة



شكل (١٢-٤٠) قوى المقاومة ضد الدفع (12-56)

ويجب الإلتفات إلى أن تدعيم الوجه (Face support) لا يستخدم فى جميع أنواع الدروع وفى حالة عدم التدعيم فإن المركبة W_4 تكون مساوية للصفر ، كما أنه فى حالة إستخدام التبطين الممتد (Expanded lining) لا يكون هناك ذيل للدرع وبالتالى فإن المركبة W_2 تكون مساوية للصفر.

وكقيمة استرشادية مرجع (12-40) يمكن اعتبار حاصل الضرب λ_p P_v فى معادلة حساب W_3 (المعادلة ١٢-١٥) مساويا $600\ KN / m^2$ ويوصى بإستخدام معامل أمان يتراوح بين ١,٥ - ٢,٠ فى حساب المركبات W_1, W_2, W_3, W_4. ويستخدم هذا المعامل لاختلاف ظروف الأداء فى التربة عن الحسابات النظرية.

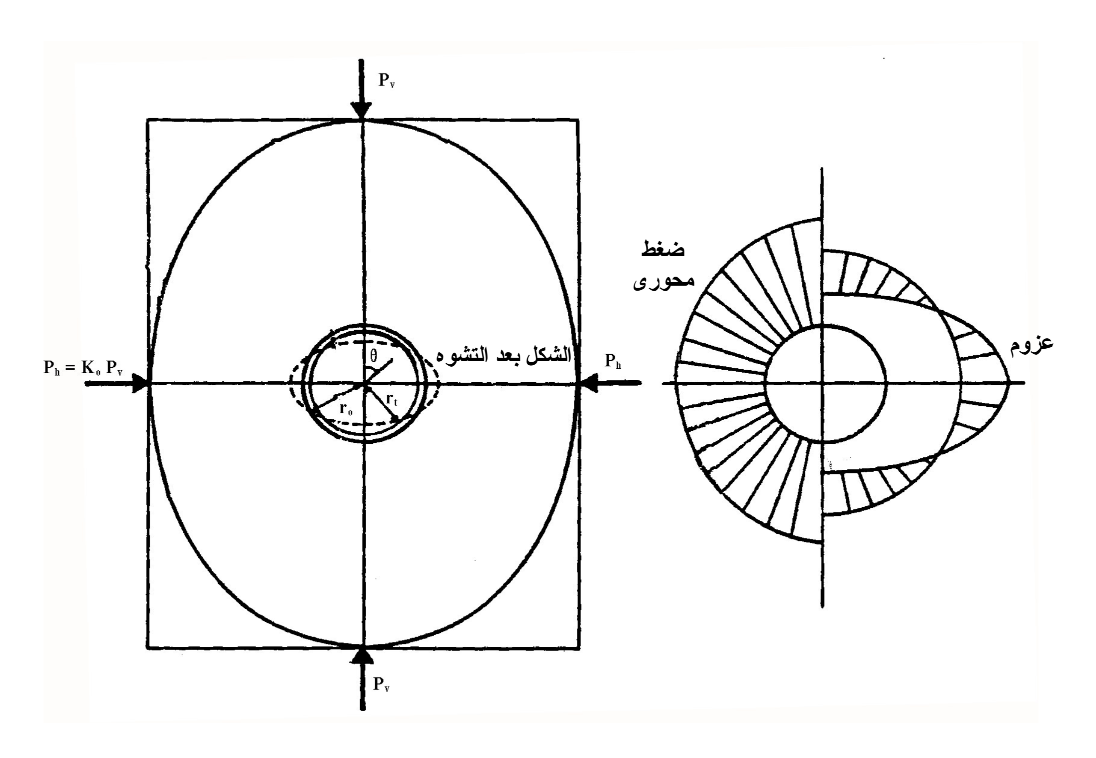
ويتم نقل قدرة الروافع إلى مركز ثقل التبطين عن طريق حلقة توزيع كما يتضح من الشكل (١٢-٤٠) ومن ثم يمكن حساب الإجهادات المتولدة فى قطع التبطين ومقارنتها بإجهادات الانهيار لقطعة التبطين فى الاتجاه الطولى والتى يتم تأكيدها بواسطة الإختبارات المعملية عن طريق المصنع لهذه القطع.

١٢-١١-٣-٢ تصميم تبطين الأنفاق لمقاومة أحمال التربة

يمكن تقسيم سلوك أحمال التربة إلى السلوك قصير المدى نتيجة إعادة توزيع الإجهادات حول النفق والسلوك طويل المدى نتيجة الزحف والإجهادات الثانوية المتولدة من المنشآت المجاورة أو عمليات الحفر المجاورة.

أولا : تصميم تبطين الأنفاق فى مواجهة السلوك قصير المدى

يتوقف السلوك قصير المدى لتبطين الأنفاق على عملية إعادة توزيع الإجهادات الناتجة عن تشكل قطاع النفق وعلى ترخيمات التبطين المرن لخلق حالة اتزان بين ضغوط التربة حول محيط النفق. ونتيجة هذا السلوك تتولد عزوم إنحناء وقوى ضغط محورية فى التبطين والتى تتغير حول محيط النفق كما يتضح من الشكل (١٢-٤١). ويهدف تحليل وتصميم التبطين إلى تقدير قيم عزوم الإنحناء وقوى الضغط والتأكد من عدم تجاوز هذه القيم للمقاومة العظمى للتبطين. ويتم ذلك فيما يلى بإستخدام الطرق العددية.



شكل (١٢-٤١) الشكل العام لمسألة تصميم تبطين النفق من حيث الإجهادات والتشوهات الناشئة وعزوم الإنحناء والضغوط المتولدة عند تبطين النفق (12-3)

أ- الإفتراضات الأساسية

١- مجال الانفعالات يكون ثنائى الأبعاد (Two dimensional plane strain problem) وذلك باعتبار انفعال التربة فى اتجاه محور النفق مساويا للصفر.
٢- ضغط التربة على التبطين فى الاتجاه القطرى لقطاع النفق يكون مساويا للضغط الطبيعى للتربة قبل حفر النفق.
٣- يمكن إعتبار أوإهمال ضغوط التربة فى اتجاه المماسات لقطاع النفق.
٤- التواء أو إنضغاط التبطين يتم مقاومته برد فعل التربة.
٥- سلوك كل من التبطين والتربة يمكن اعتباره سلوكا مرنا.
٦- نسبة الإجهاد الأفقى إلى الإجهاد الرأسى يكون مساويا للقيمة K_0 .
٧- يتحول القطاع الدائرى للتبطين إلى الشكل البيضاوى بحيث يتساوى الضغط القطرى للتربة حول محيط النفق.

ب- المصطلحات الفنية الخاصة باستقرار الأنفاق فى التربة

فيما يلى بعض المصطلحات الفنية الشائع إستخدامها فى تصميم الأنفاق فى التربة الرخوة :

١- معامل القدرة F_c (Competence factor)

$$F_c = \sigma_c / P_v \qquad (12-17)$$

حيث

σ_c = مقاومة الأرض العظمى للضغط (UCS)

P_v = الإجهاد الرأسى الأولى عند محور النفق

ويقيس هذا المعامل قدرة التربة على مقاومة الحركة (Movement) تحت تأثير حمل رأسى معين.

٢- نسبة الاستقرار N (Stability ratio)

$$N = (P_v - P_a) / Cu \qquad (12\text{-}18)$$

حيث

P_a = ضغط الهواء فى النفق زيادة عن الضغط الجوى

Cu = مقاومة القص للطين المشبع بالماء (Undrained shear strength of the clay)

وتقيس هذه النسبة مدى الاستقرار النسبى وعلاقته بحالة الإجهادات ومقاومة القص الطبيعية.

٣- نسبة المرونة F_R (Flexibility ratio) مرجع (12-40)

$$F_R = 3\, E_\ell\, I_\ell\, (1 + \upsilon_c)\, (5 - 6\upsilon_c) / [\, E_c\, \eta^3\, (r_o)^3\,] \qquad (12\text{-}19a)$$

$$\text{or}\quad F_R = 9\, E_\ell\, I_\ell / [\, \lambda\, \eta^3\, (r_o)^4\,] \qquad (12\text{-}19b)$$

حيث

E_c = معامل مرونة التربة (معامل يانج للتربة)

E_ℓ = معامل مرونة التبطين (معامل يانج للتبطين)

I_ℓ = عزم القصور الذاتى للتبطين

υ_c = نسبة بواسون للتربة

η = نسبة نصف قطر النفق إلى محور التبطين إلى نصف القطر الخارجى للتبطين (r_c / r_o)

r_o = نصف قطر النفق الى السطح الخارجى للتبطين

λ = معامل رد فعل الأرض

ونسبة المرونة F_R هى نسبة جساءة الإنحناء للتربة إلى جساءة الإنحناء للتبطين

٤- معامل الإنضغاط C_F (Compressibility factor) (12-39)

$$C_F = r_o\, E_c\, (1 - \upsilon_\ell^2) / [\, \eta\, t\, E_\ell\, (1 + \upsilon_c)\,] \qquad (12\text{-}20)$$

حيث

υ_ℓ = نسبة بواسون للتبطين

t = السمك الفعال للتبطين

ويعبر هذا المعامل عن علاقة إنضغاطية التبطين بإنضغاطية التربة المحيطة به.

ج- الطريقة العددية الأولى لتصميم التبطين المرن(12-37)

طبقا لهذه الطريقة فإن عزم الإنحناء فى التبطين يتم حسابه من المعادلة التالية :

$$M_{axis} = P_o (r_o)^2 E_\ell I_\ell (1 + \upsilon_c) / [6 E_\ell I_\ell (1 + \upsilon_c) + 2 (r_o)^3 E_c] = -M_{crown} \quad (12\text{-}21)$$

حيث

$$P_o = P_v - P_h$$

وتمثل قيمة M_{axis} أقصى عزم إنحناء موجب عند نقطة على محيط النفق. ويعرف العزم الموجب بأنه العزم الذى يعمل على تقليل نصف قطر تقوس التبطين (Radius of curvature) . ويتحقق هذا العزم الموجب عندما يكون الحد P_o فى المعادلة السابقة موجبا بمعنى أن تكون نسبة الإجهاد الأفقى P_h إلى الإجهاد الرأسى P_v $(K_o = P_h / P_v)$ أقل من واحد. وعندما تزيد قيمة K_0 عن واحد تصبح قيمة P_o سالبة وبالتالى تصبح قيمة M_{axis} سالبة وفى هذه الحالة يصبح وضع الشكل البيضاوى لقطاع النفق بعد التشوه رأسيا بدلا من أن يكون أفقيا فى حالة العزم الموجب. وعندما يكون هناك مياه أرضية فإن قيمة P_o تقل بمقدار ضغط الماء P_w .

وبالمثل فإنه يمكن حساب قوى الضغط المتولدة فى التبطين من المعادلات التالية :

$$N_{crown} = (P_o r_o / 3) + (4 \lambda \delta r_o / 3) + (P_w r_o) \quad (12\text{-}22a)$$

$$N_{axis} = (2 P_o r_o / 3) + (2 \lambda \delta r_o / 3) + (P_w r_o) \quad (12\text{-}22b)$$

ويمكن حساب معامل رد فعل الأرض λ من المعادلة التالية :

$$\lambda = 3 E_c / [r_o (1 + \upsilon_c)] \quad (12\text{-}23)$$

وتمثل δ إنحناء التبطين ، ويمكن حساب حاصل الضرب $\lambda \delta r_o / 3$ من المعادلة التالية :

$$\lambda \delta r_o / 3 = E_c P_o (r_o)^4 / A \quad (12\text{-}24a)$$

حيث

$$A = 18 E_\ell I_\ell (1 + \upsilon_c) + 6 (r_o)^3 E_c \quad (12\text{-}24b)$$

ويمكن إســتخدام قيم عزم الإنحناء وقوى الضغط المحســوبة من المعادلات الســابقة فى تقدير اتزان واســتقرار التبطين وذلك بمقارنتهــا بمنحنى الانهيــار المشــترك للتبطــين (M – N Failure envelope for lining) ويوصى بإســتخدام معامل أمان ٤ عند تصميم التبطين طبقا لهذه الطريقة (12-37).

ويمكن حساب ضغط التربة الخارجى الحرج (Critical earth pressure for stability) لاستقرار النفق المحفور فى تربة ذات خصائص مرنة من المعادلة التالية :

$$P = 3 E_\ell I_\ell / (r_o)^3 + E_c / (1 + \upsilon_c) \quad (12\text{-}25)$$

د- الطريقة العددية الثانية لتصميم التبطين المرن(12-39)

تأخذ هذه الطريقة فى الاعتبار الإجهاد فى اتجاه محور النفق والذى تم إهماله فى الطريقة الأولى لاستنتاج علاقة معدلة لمعامل رد فعل الأرض (λ) كما يلى :

$$\lambda = 3\,E_c / [\,(1 + \upsilon_c)\,(5 - 6\,\upsilon_c)\,r_o\,] \qquad (12\text{-}26)$$

وبإهمال قوى القص بين التبطين والتربة فإن أقصى قيمة لعزم الإنحناء عند محور النفق يمكن حسابها من المعادلة التالية :

$$M_{axis} = P_0\,(r_o)^2\,\eta^2\,E_{\perp}\,I_{\perp}\,(1 + \upsilon_c)\,(5 - 6\,\upsilon_c) / B = -\,M_{crown} \qquad (12\text{-}27a)$$

حيث

$$B = 6\,E_{\perp}\,I_{\perp}\,(1 + \upsilon_c)\,(5 - 6\,\upsilon_c) + 2\,\eta^3\,(r_o)^3\,E_c \qquad (12\text{-}27b)$$

ويمكن اختصار معادلة عزم الإنحناء السابقة إلى :

$$M_{axis} = P_0\,(r_o)^2\,\eta^2\,(F_R / (1 + F_R)) / 6 = -\,M_{crown} \qquad (12\text{-}27c)$$

حيث

F_R = نسبة المرونة (Flexibility ratio)

وبحساب قيمة λ يمكن حساب قيمة F_R وبالتالى حساب كل من M_{axis} , M_{crown} من المعادلات السابقة.
وبالأخذ فى الاعتبار تأثير قوى القص بين التبطين والتربة فإن علاقة جديدة لمعامل رد فعل التربة (λ) يمكن استنتاجها بالصورة التالية :

$$\lambda = 3\,(P + 5\,T)\,E_c / C \qquad (12\text{-}28a)$$

$$C = r_o\,(1 + \upsilon_c)\,[\,(5 - 6\,\upsilon_c)\,P + 2\,(13 - 15\,\upsilon_c)\,T\,] \qquad (12\text{-}28b)$$

حيث

T = إجهاد القص عند محور النفق

ρ = القيمة القصوىL($\rho - \rho'$) ± حيث ρ هى أقصى قيمة لضغط الأرض فى اتجاه نصف القطر عند أى نقطة على محيط النفق ، ρ' هى قيمة ρ_ρ المتوسطة

وتحسب قيمة ρ من المعادلة (١٢-٢٩)

$$\rho = [\,P_v - P_o\,(1 - \cos 2\theta) / 2\,] / 2 \qquad (12\text{-}29)$$

حيث

$P_o = P_v - P_h$

والزاوية θ كما هى معرفة فى الشكل (١٢-٤١)

وتكون قيمة M_{axis} فى هذه الحالة أقل منها فى حالة إهمال قوى القص بين التبطين والتربة.

وفى حالة وجود ضغط للمياه الأرضية فإنه يمكن حساب الإجهادات المتولدة عنها فى اتجاه نصف القطر σ_r (Radial stresses) واتجاه المماس σ_θ (Tangential stresses) حول الحفر والمنتقلة إلى التبطين من المعادلات التالية :

$$\sigma_r = q\,[\,(r_o)^2 \log_e r_o - r^2 \log_e r\,] / [\,2\,K\,(1 - \upsilon_c)] \qquad (12\text{-}30a)$$

$$\sigma_\theta = q\,(1 - (r_o)^2 \log_e r_o + r^2 \log_e r + r^2) / [\,2\,K\,(1 - \upsilon_c)\,r^2] \qquad (12\text{-}30b)$$

حيث

σ_r = الإجهاد فى اتجاه نصف قطر الحفر

σ_θ = الإجهاد فى اتجاه المماس لنصف قطر الحفر

K = نفاذية التربة

q = تصرف الماء (Discharge) لوحدة المساحة فى وحدة الزمن

r = نصف قطر ما (General radius)

وتستخدم المعادلتين السابقتين فى حالة ما إذا كانت نفاذية التبطين أكبر من نفاذية التربة. أما إذا كانت نفاذية التبطين أقل من نفاذية التربة فإن على التبطين مقاومة الضغط الهيدروستاتيكى الكلى.

وتضاف الإجهادات المتولدة عن الماء الأرضى إلى الإجهادات المتولدة عن أحمال الأرض للحصول على الإجهادات الكلية التى يجب أن يتحملها النفق.

ويجب الانتباه إلى أن قيمة معامل مرونة التبطين E_1 فى جميع معادلات هذه الطريقة خاصة بقطعة التبطين (Segmental lining) . وفى حالة التبطين المستمر (Continuous lining) يجب زيادة هذه القيمة إلى $E_1 / (1 - \upsilon_1^2)$ حيث υ_1 = نسبة بواسون للتبطين.

كما أنه فى حالة التبطين المكون من العديد من القطع فإن جساءة الوصلات (Joint stiffness) تكون عادة أقل من جساءة القطعة نفسها وبالتالى فإن قيمة عزم القصور الذاتى I_1 المستخدمة فى المعادلات السابقة يجب تعديلها لتكون :

$$I_\ell\,eff = I_j + (4 / n)^2 \qquad \text{for } I_\ell\,eff < I_\ell \text{ and } n > 4$$

حيث

I_j = عزم القصور الذاتى عند الوصلة

n = عدد قطع التبطين

وفى حالة $I_j >> I_\ell$ وهى حالة الوصلة المفصلية (Articulated joint) وتكون الحلقة من عدد ٨ قطع فإن قيمة عزم القصور الذاتى $I_\ell\,eff$ تكون :

$I_\ell \; eff = I_\ell / 4$

هـ- الطريقة العددية الثالثة لتصميم التبطين المرن(12-17)

هذه الطريقة هى امتداد للطريقة الثانية السابق توضيحها مع إدخال عامل الزمن. وفى هذه الطريقة يمكن الحصول على قيم عزم الإنحناء M والضغط N عند أى نقطة محيط التبطين وبإهمال قوى القص بين التبطين والتربة من المعادلات التالية :

$$M = P_o (r_o)^2 / 2 - [(3 - 4 \upsilon_c) \cos 2\theta] / (5 - 6 \upsilon_c + 4 Q_2) \qquad (12\text{-}31a)$$

$$N = (- P_o r_o / 2) (3 - 4 \upsilon_c) \cos \theta / (5 - 6 \upsilon_c + 4 Q_2) \qquad (12\text{-}31b)$$

حيث

$$Q_2 = (E_c / E_l) [1 / (1 + \upsilon_c)] (r_o)^3 / 12 I_l \qquad (12\text{-}31c)$$

وتعريف Q_2 فى المعادلات السابقة مشابه لتعريف نسبة المرونة F_R فى الطريقة الثانية.

وبالأخذ فى الاعتبار قوى القص بين التبطين والتربة فإنه يمكن حساب أقصى قيمة لعزم الإنحناء وأقصى قيمة للضغط فى التبطين من المعادلتين التاليتين :

$$M_{max} = \pm (P_o r_o / 4) / \{ 1 + Q_2 (3 - 2 \upsilon_c) / (3 - 4 \upsilon_c) \} \qquad (12\text{-}32a)$$

$$N_{max} = \pm (P_o r_o / 2) / \{ 1 + 2 \upsilon_c Q_2 / [(3 - 4 \upsilon_c) (1 + Q_2)] \} \qquad (12\text{-}32b)$$

و- الطريقة نصف التجريبية لتصميم الأنفاق Semi-empirical Design (12-46)

تعتمد هذه الطريقة على المعلومات التى يتم تجميعها من سلوك الأنفاق السابق إنشاؤها والقياسات التى تمت عليها. ولتصميم تبطين مناسب إعتمادا على هذه الطريقة يجب أن يتوافر فى التبطين الاشتراطات التالية :

١- مقاومة قوى الضغط الواقعة عليه (Hoop stresses).
٢- مرونة مناسبة للتحكم فى عزوم الإنحناء المتولدة به كنتيجة للترخيمات (Deflections) الحادثة به.
٣- عدم حدوث انهيار به نتيجة الانبعاج (Buckling failure) .
٤- عدم تعرضه لأحمال إضافية مثل الناتجة عن نفق قريب أو عن وزن مبان سطحية قريبة وغيرها.

ويمكن حساب الضغط فى التبطين من المعادلة التالية بإفتراض عدم حدوث تشوهات قطرية (Radial deformations) .

$$N = \gamma Z_o r_o (1 + K_o) / 2 = P_{av} r_o \qquad (12\text{-}33)$$

حيث

$P_{av} = (P_v + P_h) / 2$ عند عمق محور النفق.

وإفتراض عدم حدوث التشوهات القطرية هو إفتراض آمن حيث أن حدوث هذه التشوهات فى الطبيعة يؤدى إلى تخفيض الضغط فى التبطين كما أن التأخير فى إنشاء نظام التبطين يؤدى أيضا إلى تقليل الضغط فى التبطين.
ولحساب عزوم الإنحناء فى التبطين يلزم معرفة التغير فى نصف قطر التبطين للأشكال المختلفة لقطاع النفق وفى الأنواع المختلفة من التربة. ويمكن الاسترشاد بالجدول التالى (12-53) فى هذا الصدد.

نوع التربة	نسبة التغير القصوى فى نصف القطر ($\Delta R / R$)
الطين المتماسك (Stiff) إلى الطين الصلب (Hard)	٠,١٥ - ٠,٤٠ %
الطين الرخو (Soft) أو الطمى	٠,٢٥ - ٠,٧٥ %
الرمل الكثيف (Dense) أو المتماسك (Cohesive)	٠,٠٥ - ٠,٢٥ %
الرمل المفكك (Loose)	٠,١٠ - ٠,٣٥ %

ويضاف إلى القيم المبينة فى الجدول أعلاه نسبة تتراوح بين ٠,١٠ - ٠,٣٠ % للأنفاق المعرضة للهواء المضغوط (Compressed air) طبقا لقيمة ضغط الهواء.

ز- إستخدام طريقة العناصر المحددة فى التصميم

فى إطار هذه الطريقة يستخدم Continuum اللاخطى (Non-linear) أو العنصر الخطى (Beam element) فى تمثيل التبطين بينما يستخدم العنصر الأيزوبارامترى (Isoparametric element) فى تمثيل التربة بالإضافة إلى عنصر ربط بين التبطين والتربة (Interface element) فى النموذج الرياضى لتحليل الأنفاق. ويمكن أن يكون هذا النموذج مستويا أو يكون ثلاثى الأبعاد.

ثانيا : تصميم تبطين الأنفاق فى مواجهة السلوك طويل المدى

يقصد بالسلوك طويل المدى زحف التربة (Creep of ground) . وفى العادة يقتصر هذا الزحف على التربة المتماسكة (Cohesive soil) مثل الطين. ويمكن تقدير الزحف من العلاقة التالية (12-54):

$$\varepsilon_{creep} = A\, e^{\alpha D}\ (t_1 / t)^m \qquad (12\text{-}34)$$

حيث

A = معدل الانفعال عند زمن t_1
D = المستوى القياسى للإجهاد (Normalized stress level)
α = ميل الجزء الخطى من العلاقة المرسومة بين Log D , Log ∈ عند زمن ثابت
t = الزمن
m = الميل السالب للعلاقة المرسومة بين Log D , Log ∈

ثالثا : هبوط سطح التربة المصاحب لحفر الأنفاق فى التربة

يجب الاهتمام بهبوط سطح التربة الناتج عن حفر الأنفاق فى التربة الرخوة فى المناطق الحضارية حيث يمكن أن يؤدى هذا الهبوط إلى الإضرار بالمنشآت القائمة القريبة من النفق. ولدراسة هذه الظاهرة يمكن الاستعانة بالنموذج المبين بالشكل (١٢-٤٢).

أ- دراسة استقرار ارتفاع سطح التربة فوق النفق المشقوق بالتربة الطينية

Stability of Tunnel Heading in Clay

يمكن حساب نسبة الاستقرار N (Stability ratio) من المعادلة التالية (12-12):

$$N = [\ \sigma_s + \gamma\ (C + D / 2) - \sigma_T\ ]\ /\ Cu \qquad (12\text{-}35)$$

حيث

σ_s = الحمل الموزع فوق سطح الأرض

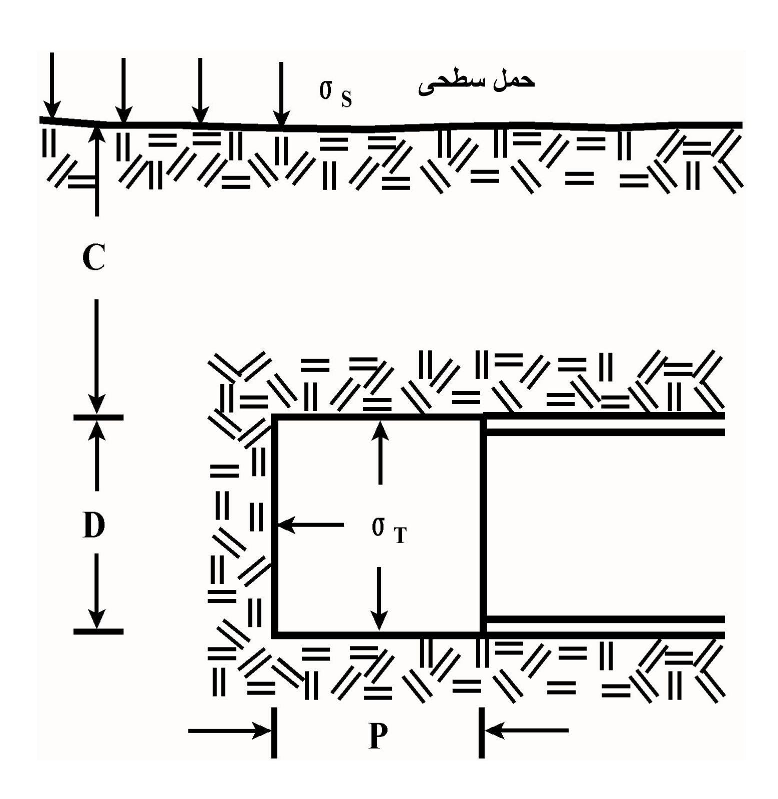
γ = كثافة التربة

C = عمق التربة أعلى النفق (Depth to tunnel crown)

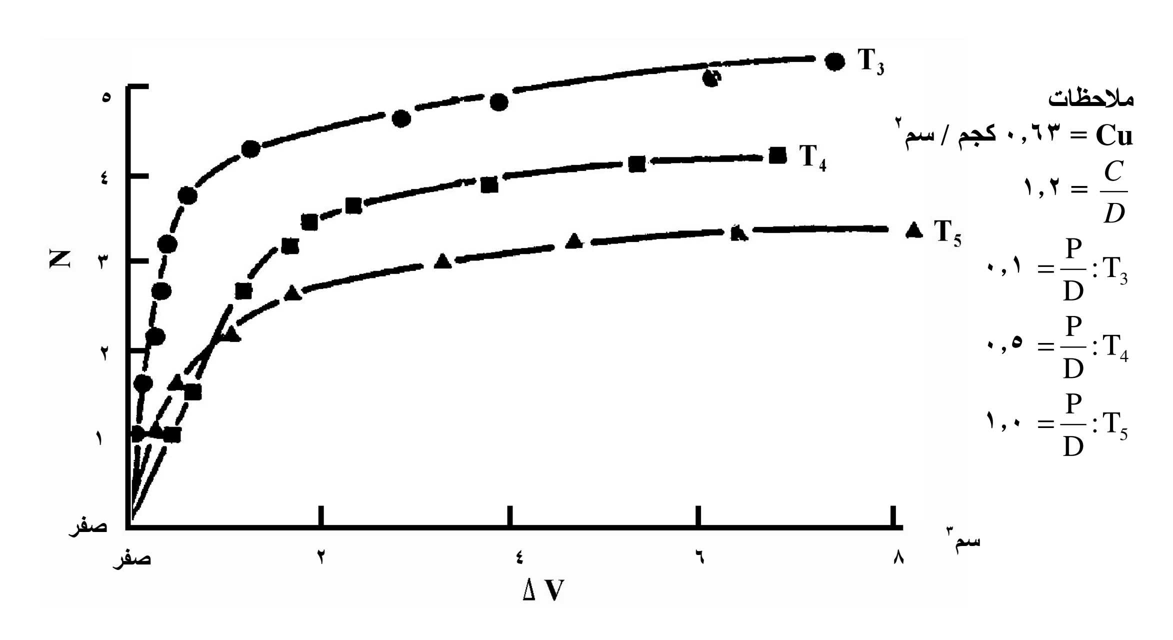
D = قطر النفق

σ_T = ضغط نظام الارتكاز على التربة (Support pressure) شكل (١٢-٤٢)

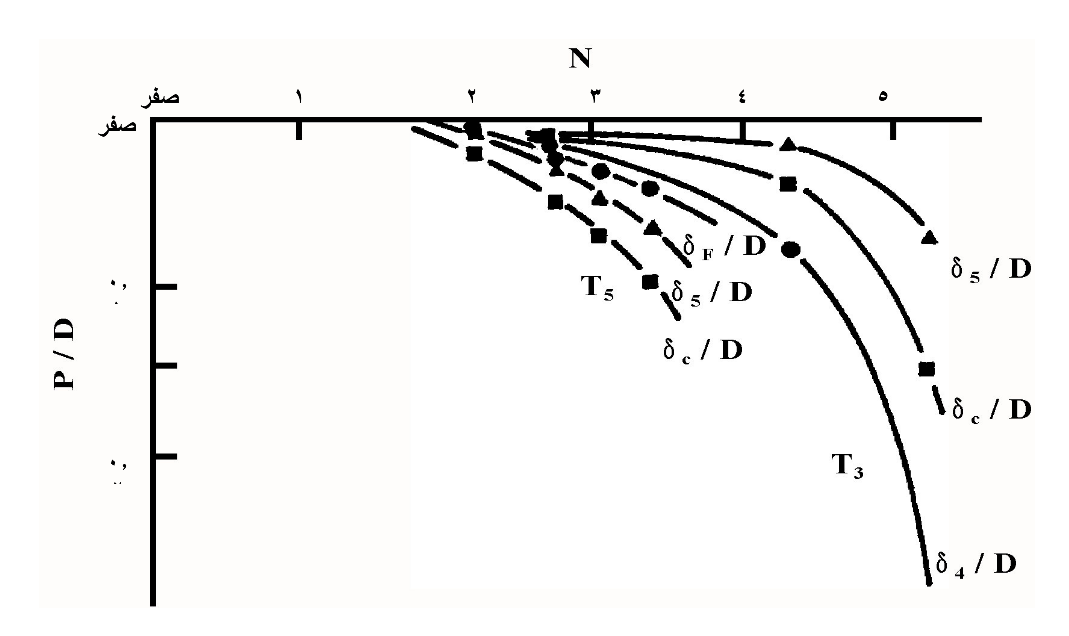
Cu = مقاومة القص للتربة المحصورة (Undrained shear strength)



شكل (١٢-٤٢) تمثيل مقدمة النفق أثناء إنشائه



شكل (١٢-٤٣) تغير حجم النفق مع نسبة الاستقرار خلال تجارب يمنع فيها تصرف المياه



شكل (١٢-٤٤) ازاحات مقاسة عند مقدمة النفق (δ_f) وعند قمته (δ_c) وعند السطح (δ_s) مع تغير نسبة الاستقرار

وقد أظهرت النتائج أنه إذا زادت قيمة N عن ٦,٠ فإن ارتفاع التربة فوق النفق يصبح غير مستقر (Unstable heading) وأنه إذا قلت قيمة N كثيرا عن ٦,٠ فإنه تحدث تشكلات لدنه فى التربة (Plastic deformation) .

وللاسترشاد يوضح الجدول التالى (13-12) نتائج بعض الإختبارات التى أجريت لمعرفة تأثير تغير أبعاد الشكل الهندسى للنفق ونظام الارتكاز على نسبة الاستقرار N فى التربة الطينية شكل (١٢-٤٢).

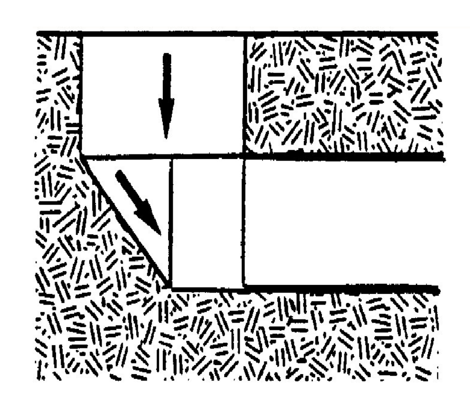
N	P / D	C / D	الأختبار
٣,٨	صفر	٠,٣	T_1
٥,٠	صفر	١,٢	T_2
٥,٤	٠,١	١,٢	T_3
٤,٣	٠,٥	١,٢	T_4
٣,٥	١,٠	١,٢	T_5
٥,٣	صفر	٢,٨	T_6

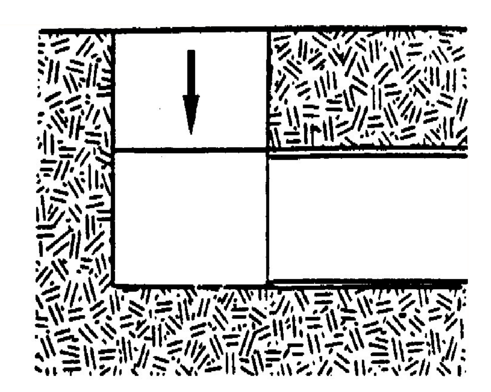
ويوضح الشكل (١٢-٤٣) العلاقة بين نسبة الاستقرار N والنقص فى حجم التربة أعلى النفق (Volume of tunnel heading) لثلاثة إختبارات مبينة فى الجدول السابق. ويلاحظ من هذه العلاقة أن التشوهات تكون مرنة فى البداية ثم لا تلبث أن تكون لدنه وتؤدى إلى انهيار النفق.

كما يوضح الشكل (١٢-٤٤) علاقة نسبة الاستقرار N بكل من هبوط سطح الأرض δ_s وهبوط قمة النفق δ_c وإزاحة مقدمة النفق δ_f (Displacement of tunnel) مع تغير نسبة (δ / D) شكل (١٢-٤٢) لتقدير تأثير وضع الارتكاز على سلوك النفق. ويتضح من هذا الشكل أنه للقيم المنخفضة لنسبة (P / D) فإن δ_f تكون أكبر من δ_c فى حين أنه للقيم العالية للنسبة (P / D) فإن δ_c تصبح أكبر من δ_f . وأيضا فإنه عند أى قيمة لنسبة الاستقرار N تكون قيم الهبوط δ_c , δ_s , δ_f أكبر مع زيادة النسبة (P / D)

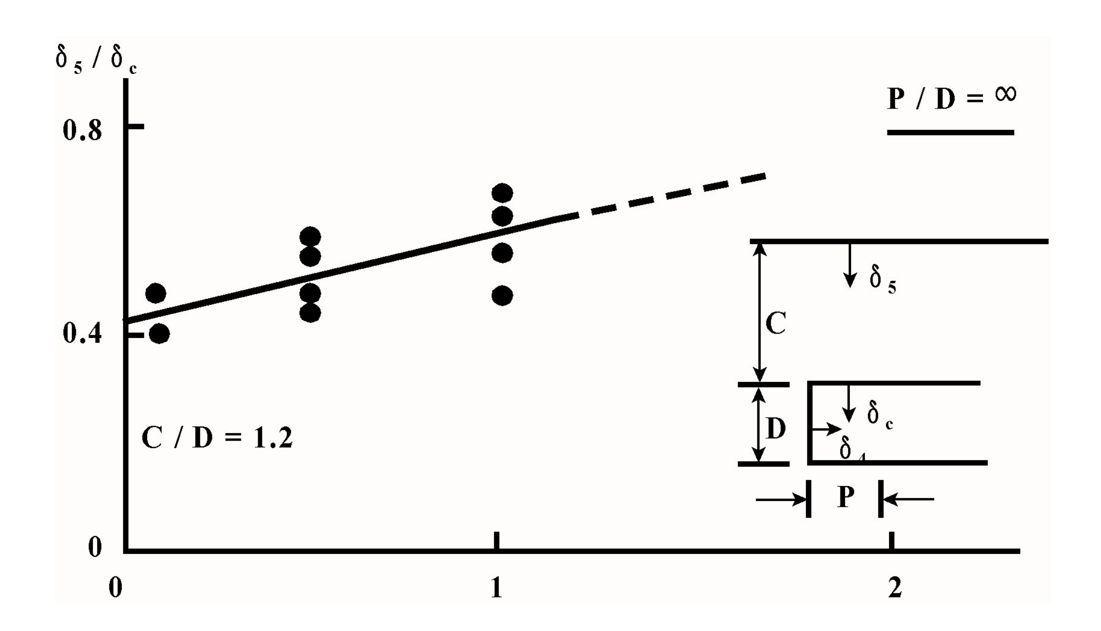
وبالتالى فإن حالتين مختلفتين من الانهيار يمكن أن تحدثا فى التربة المحيطة بالنفق طبقا للنسبة (P / D) ، وهاتان الحالتان موضحتان بالشكل (١٢-٤٥).

ويوضح الشكل (١٢-٤٦) العلاقة بين نسبة هبوط السطح إلى هبوط قمة النفق δ_s / δ_c والنسبة (P / D) ويقترح أن تكون القيمة القصوى للنسبة $\frac{\delta_s}{\delta_c}$ هى ٠,٨ عندما تصل (P / D) إلى مالانهاية (نفق غير مبطن). ويوضح الشكل (١٢-٤٧) العلاقة بين نسبة الاستقرار عند الانهيار N_{Tc} والنسبة (P / D) ويتضح من هذا الشكل أن وضع الارتكاز عند مقدمة النفق مباشرة (P / D = 0) يحقق اتزانا واستقرارا أكثر مرتين عما إذا ما تم وضع الارتكاز على بعد أربعة أمثال قطر النفق خلف مقدمة النفق.

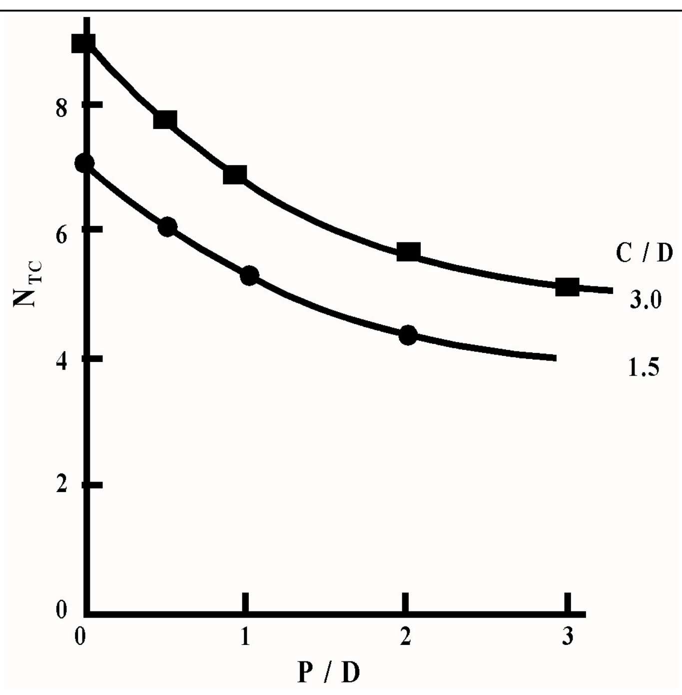




شكل (١٢-٤٥) حالتان للانهيار فى منطقة مقدمة النفق



شكل (١٢-٤٦) تغير نسبة هبوط سطح الأرض إلى هبوط قمة النفق مع الأبعاد الهندسية لمقدمة النفق



شكل (١٢-٤٧) تأثير الأبعاد الهندسية لمقدمة النفق على رقم الاستقرار عند الانهيار (من تجارب نماذج بجهاز Centrifuge)

ب- تقدير هبوط سطح التربة

يمكن تقدير هبوط سطح التربة أعلى النفق من المعادلة التالية مرجع (12-42):

$$S = S_{max} \exp [- y^2 / 2 i^2] \qquad (12\text{-}36a)$$

حيث

S = هبوط سطح التربة عند مسافة عرضية y

S_{max} = أقصى قيمة للهبوط S على طول محور النفق

i = مسافة أفقية بين محور النفق ونقطة تغير الإنحناء (Point of inflection) فى منخفض الهبوط (Settlement trough).

كما يمكن حساب حجم منخفض الهبوط V لوحدة الأطوال من طول النفق من المعادلة التالية (12-42):

$$V = \sqrt{2\pi}\ i\ S_{max} = 2.5\, i\, S_{max} \qquad (12\text{-}36b)$$

كما يمكن حساب قيمة i للتربة المتماسكة (Cohesive soil) من المعادلة التالية (12-43):

$$i = 0.43\ Z + 1.1 \qquad (12\text{-}36c)$$

حيث

Z = عمق محور النفق بالأمتار

١٢-١١-٤ تصميم الأنفاق فى الصخر

تضم الأنفاق المحفورة فى الصخر كلا من أنفاق الهندسة المدنية وأنفاق المناجم وتختلف أعماق هذه الأنفاق من عدة أمتار أسفل منسوب سطح الأرض بالنسبة لأنفاق الهندسة المدنية إلى أكثر من ثلاثة آلاف متر بالنسبة لأنفاق المناجم. ويؤدى اختلاف الغرض من النفق إلى تنوع نظم السند المستخدمة (Support system) وتنوع طرق الإنشاء مما يضع قيودا على طريقة التصميم المتبعة. وتؤثر طرق تشوه الصخر (Rock deformation processes) على طريقة التصميم حيث يمكن تصنيف ثلاثة طرق رئيسية لتشوه الصخر تحتاج كل منها إلى أسلوب تصميم مختلف :

١- فقد الاتزان نتيجة البناء الصخرى نفسه (Rock structure) : وذلك عند وجود طبقات ضعيفة (Bedding planes) ، وصلات ، فوالق (Faults) بالإضافة إلى حركة الكتل المنفصلة تحت تأثير الجاذبية الأرضية.
٢- الإجهادات المتولدة من تكوين النفق والتى تسبب بعض الانهيارات الموضعية فى الصخر (Localized rock failure) وتحركات كبيرة فى فتحة النفق (Large movements) .
٣- تأثير حالة الصخر شبة المتصدع (Semi failed) قبل الحفر. وتؤدى هذه الحالة إلى حدوث تشوهات كبيرة فى قطاع النفق حتى عند تولد إجهادات ضعيفة فى الصخر وكون مقاومة الصخر أكبر بكثير من هذه الإجهادات.

ونظرا لأن أنفاق الهندسة المدنية تكون عادة على أعماق صغيرة من سطح الأرض فإن الإجهادات المتولدة عن حفر هذه الأنفاق تكون صغيرة وتكون رتبة الصخر عالية (High rock mass degradation) وبالتالى فإن استقرار النفق يعتمد على البناء الصخرى (كما فى الطريقة السابقة رقم ١) أو يتعلق بالتشوهات المتولدة فى كتلة الصخر ذات المقاومة الضعيفة (كما فى الطريقة السابقة رقم ٣).

كما يجب الأخذ فى الاعتبار بعض العوامل الأخرى التى تؤثر فى استقرار النفق المحفور فى الصخر وأهمها الانتفاخ (Swelling) الذى يمكن أن يحدث فى الصخر نتيجة تأثير الماء ويؤدى إلى زيادة حجم الصخر. ويتوقف هذا الانتفاخ على التركيب المعدنى للصخر. ويؤدى هذا الانتفاخ إلى تولد ضغوط كبيرة على نظام سند النفق يمكن أن تتسبب فى انهياره وتكون إجراءات إصلاحه بعد تشغيل النفق غير عملية إن لم تكن مستحيلة.

١٢-١١-٤-١ تصميم الأنفاق فى مواجهة البناء الصخرى
Design of Tunnel with Respect to Rock Structure

يعد فحص البناء الصخرى لكتلة الصخر من العوامل الأساسية عند تصميم الأنفاق المحفورة فى االصخر. ويؤثر البناء الصخرى على كل من المجالات التالية :

١- كسر الصخر ومدى استقرار مقدمة النفق (Tunnel face).
٢- قطاع النفق قبل إنشاء أو تركيب نظام السند.
٣- طول الجزء غير المبطن من النفق الذى يمكن إستخدامه بأمان (Unsupported length) .
٤- الأحمال الواقعة على نظام السند من الحفر المفكك (Loose material).
٥- الإجهادات المتولدة فى نظام السند والناتجة من انهيار كتلة الصخر والتحركات الكبيرة لهذه الكتلة.

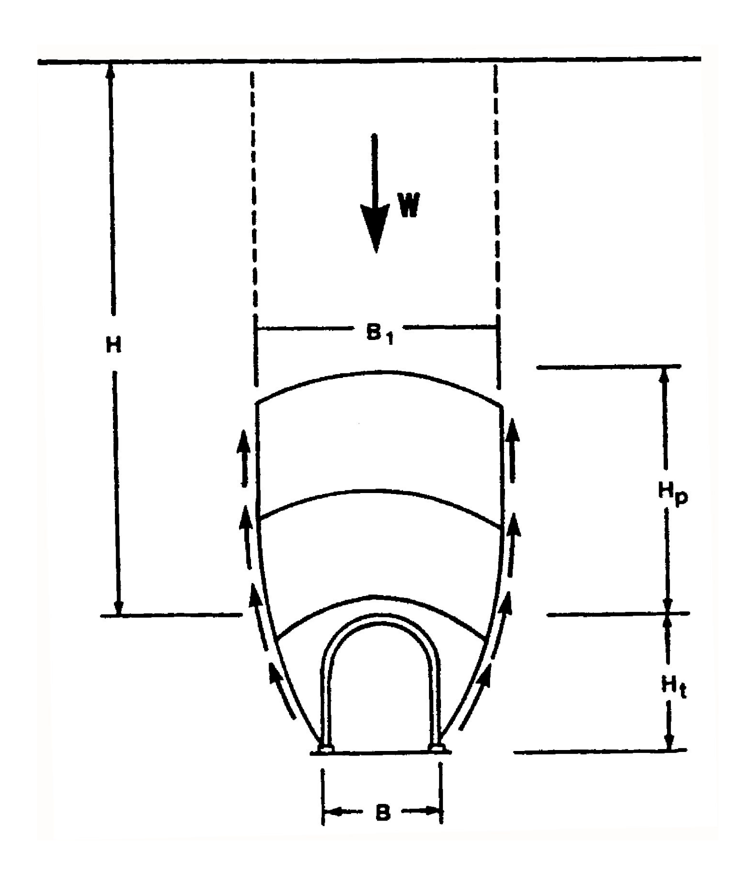
وعموما فإن اقتراب الفواصل والمستويات الضعيفة والوصلات من بعضها فى كتلة الصخر يؤدى إلى ضعف هذه الكتلة وعدم استقرارها عند إنشاء النفق.

أولا : نظم تصنيف كتلة الصخر Rock Mass Classification System

من المفيد قبل مناقشة نظم تصنيف كتلة الصخر لتصميم نظام السند التأكيد على أن السند المؤقت الذى يبشأ عند أو بالقرب من مقدمة النفق هو المكون الرئيسى فى نظام السند فى أنفاق الهندسة المدنية. وعلى الرغم من إنشاء سند أبتدائى أونهائى لهذه الأنفاق على مسافة خلف مقدمة النفق فإن السند المؤقت يتطلب عناية خاصة فى تصميمه باعتباره المقاوم الأول للأحمال.

أ- النظام الأول لتصنيف الصخر

يمكن إستخدام التصنيف التالى للصخر(12-57) لتقدير درجة السند المطلوبة بإستخدام أطقم الصلب فقط (Steel sets) ولا يستخدم هذا التصنيف مع نظم السند بإستخدام الخرسانة المقذوفة (Shotcrete) أو مسامير الصخر (Rock bolting) . ويعتمد هذا التصنيف على شكل التحميل (Loading configuration) المبين بالشكل (١٢-٤٨) والذى يفترض أن عمق النفق (H) كاف لتخليق الفعل القوسى للأرض (Arching action) وأن حمل الصخر لا يتوقف عمليا على عمق النفق. والحد الأدنى للعمق الذى يتحقق عنده هذا الإفتراض يقدر بمرة ونصف مجموع ارتفاع وعرض النفق $(H_t + B)$.



شكل (١٢-٤٨) تمثيل مبسط لأحمال الصخر على النفق مرجع (12-57)

ويوضح الجدول التالى ارشادات تصميم وتبطين الأنفاق مع تغير حمل الصخر H_p عند زيادة عمق النفق عن مره ونصف $(H_t + B)$ مرجع (12-57)

ملاحظات	ارتفاع حمل الصخر (H_P) المؤثر على سقف النفق عند زيادة عمق النفق عن $1.5\ (B + H_t)$	نوعية الصخر
	صفر	١- صخر صلب وسليم
تبطين خفيف فقط إذا حدث انشطار Spalling or popping	0.5 B	٢- صخر صلب على طبقات
تبطين خفيف ضد الانشطار	0 to 0.25 B	٣- صخر كثيف معتدل الوصلات
يهمل الضغط الجانبى	0.25 B to 0.35 $(B + H_t)$	٤- صخر معتدل الكتلية ومعرق Moderately blocky and seamy
إهمال أو قليل من الضغط الجانبى	0.35 to 1.10 $(B + H_t)$	٥- صخر شديد الكتلية ومعرق Heavy blocky and seamy
ضغط جانبى هام Significant	1.1 $(B + H_t)$	٦- صخر مهشم تماما Completely crushed
ضغط جانبى عالى يوصى بإستخدام أعصــاب دائــرية مــن الصــلب Circular ribs	1.10 to 2.10 $(B + H_t)$	٧- صخر مضغوط بارتفاع متوسط Squeezing rock, moderate depth
	2.10 to 4.5 $(B + H_t)$	٨- صخر مضغوط بارتفاع مؤثر Significant depth
مطلوب أعصاب دائرية من الصلب.	حتى ٧٦ متر بصرف النظر عن $(B + H_t)$	٩- صخر قابل للانتفاخ Swelling rock

ويمكن إستخدام المعادلات التالية لحساب مركبات الضغط الرأسى (P_v) والضغط الأفقى (P_h) المطلوب أن يوفرها نظام السند لمعادلة الأحمال الناتجة من الجدول السابق والشكل (١٢-٤٨) مرجع (12-57):

$$P_v = \gamma\ [\ B_1 + 2\ H_t \tan (45^o - \varphi / 2)\ ] / 2 \tan \varphi \qquad (12\text{-}37a)$$

$$P_h = 0.3\ (0.5\ H_t\ \gamma + P_v) \qquad (12\text{-}37b)$$

حيث
γ = كثافة الصخر
φ = زاوية الاحتكاك الداخلى للصخر

ب- النظام الثانى لتصنيف الصخر

يمكن تصنيف الصخر استرشادا بالمؤشر الكمى بمدلول نوعية الصخر RQD (Rock quality designation) والذى يعرف بأنه النسبة المئوية لمجموع أطوال القطع السليمة المستخلصه بأطوال يزيد كل منها عن ١٠٠مم الى الطول الكلى للعينه (Core) الصخرية

$$RQD\ \% = \frac{\text{مجموع أطوال قطع العينه التى يزيد كل منها عن ١٠٠مم}\times ١٠٠}{\text{الطول الكلى للعينه}}$$

ويوضح الجدول التالى مرجع (12-20) تصنيف الصخر طبقا لقيمة مدلول نوعية الصخر (RQD) والذى يعتبر مفيدا جدا فى التوجيه إلى إختيار وتصميم نظام السند المناسب.

%RQD	تصنيف نوعية الصخر
أقل من ٢٥	ضعيف جدا Very poor
٢٥ - ٥٠	ضعيف
٥٠ - ٧٥	متوسط Fair
٧٥ - ٩٠	جيد
٩٠ - ١٠٠	ممتاز

ويوضح الجدول التالى مرجع (12-19) التوصيات الخاصة بنظام السند طبقا لقيمة مدلول نوعية الصخر (RQD) وطريقة الحفر المتبعة.

RQD	طريقة الحفر	نظم أختياريه للسند		
		أطقم الصلب	مسامير الصخر	الخرسانة المقذوفة
ممتاز	ماكينة الحفر (TBM)	يستخدم أحيانا كطقم خفيف. حمل الصخر B = (0 to 0.2)	يستخدم أحيانا	يستخدم أحيانا
	طرق الحفر التقليدية	يستخدم أحيانا كطقم خفيف. حمل الصخر B = (0 to 0.3)	يستخدم أحيانا	يستخدم أحيانا بسمك من ٥٠ - ٧٥ مم
جيد	ماكينة الحفر	يستخدم أحيانا كطقم خفيف بتباعد من ١,٥ - ٢,٠ متر	يستخدم أحيانا بتباعد من ١,٥ - ٢,٠ متر	يستخدم أحيانا بسمك من ٥٠ - ٧٥ مم
	طرق الحفر التقليدية	طقم خفيف بتباعد من	يستخدم بتباعد من	يستخدم أحيانا بسمك

RQD	طريقة الحفر	نظم أختياريه للسند		
		أطقم الصلب	مسامير الصخر	الخرسانة المقذوفة
متوسط	ماكينة الحفر	١,٥ ـ ٢,٠ متر طقم خفيف أو متوسط بتباعد من ١,٥ ـ ٢,٠ متر حمل الصخر = (0.4 to 1.0) B	١,٥ ـ ٢,٠ متر نظام سند محدد بتباعد من ١,٥ ـ ٢,٠ متر	من ٥٠ ـ ٧٥ مم يستخدم بسمك من ٥٠ ـ ١٠٠ مم لسقف النفق (Crown)
	طرق الحفر التقليدية	طقم خفيف أو متوسط بتباعد من ١,٢ ـ ١,٥ متر حمل الصخر = (0.6 to 1.30) B	نظام سند محدد بتباعد من ٠,٩ ـ ١,٥ متر	يستخدم بسمك ١٠٠ مم للسقف والجوانب
ضعيف	ماكينة الحفر	طقم متوسط من الأعصاب الدائرية بتباعد من ٠,٩ ـ ١,٢ متر	نظام سند محدد بتباعد من ٠,٩ ـ ١,٥ متر	يستخدم بسمك من ١٠٠ ـ ١٥٠ مم للسقف والجوانب بالإضافة إلى المسامير
	طرق الحفر التقليدية	طقم متوسط أو ثقيل بتباعد من ٠,٦ ـ ١,٢ متر حمل الصخر = (1.3 to 2.0) B	نظام سند محدد بتباعد من ٠,٦ ـ ١,٢ متر	يستخدم بسمك ١٥٠ مم أو أكثر للسقف والجوانب بالإضافة إلى البراغى
ضعيف جدا ولا يحتوى على صخر مضغوط أو قابل للانتفاخ	ماكينة الحفر	طقم متوسط أو ثقيل بتباعد ٠,٦ متر حمل الصخر = (1.6 to 2.2) B	نظام سند محدد بتباعد من ٠,٦ ـ ١,٢ متر	يستخدم بسمك ١٥٠ مم لكل القطاع بالإضافة إلى طقم متوسط من الصلب
	طرق الحفر التقليدية	طقم ثقيل من الأعصاب الدائرية بتباعد ٠,٦ متر حمل الصخر = (1.6 to 2.2) B	نظام سند محدد بتباعد ٠,٩ متر	يستخدم بسمك ١٥٠ مم لكل القطاع

RQD	طريقة الحفر	نظم أختياريه للسند		
		أطقم الصلب	مسامير الصخر	الخرسانة المقذوفة
ضعيف جدا (تربة مضغوطة وقابلة للانتفاخ)	ماكينة الحفر	طقم ثقيل جدا من الأعصاب الدائرية بتباعد ٠,٦ متر حمل الصخر حتى ٧٥ متر	نظام سند محدد بتباعد ٠,٦ - ٠,٩ متر	يستخدم بسمك ١٥٠ مم أو أكثر لكل القطاع بالإضافة إلى طقم ثقيل من الصلب
	طرق الحفر التقليدية	طقم ثقيل جدا من الأعصاب الدائرية بتباعد ٠,٦ متر حمل الصخر حتى ٧٥ متر	نظام سند محدد بتباعد ٠,٦ - ٠,٩ متر	يستخدم بسمك ١٥٠ مم أو أكثر لكل القطاع بالإضافة إلى طقم ثقيل من الصلب

ج- النظام الثالث لتصنيف الصخر

فى هذا النظام يتم إستخدام معدل البناء الصخرى RSR (Rock structure rating) لتوصيف الكتلة الصخرية وتصميم نظام السند للأنفاق فى الصخر. ويتميز معدل البناء الصخرى RSR بأنه يأخذ فى الاعتبار مختلف العوامل التى تؤثر على سلوك كل من الكتلة الصخرية ونظام السند مثل :

١- أنواع الصخر.
٢- طبيعة الفواصل.
٣- الميل (الانحراف) والصدم Dip and strike .
٤- عدم الاستمرارية Discontinuities .
٥- الصدوع والقص والطيات Faults, shears and folds.
٦- المياه الأرضية.
٧- خواص المواد المكونة للصخر.
٨- التحات أو التحوير Weathering or alteration .
٩- اتجاه سير الحفر.
١٠- حجم النفق.
١١- طريقة الحفر.

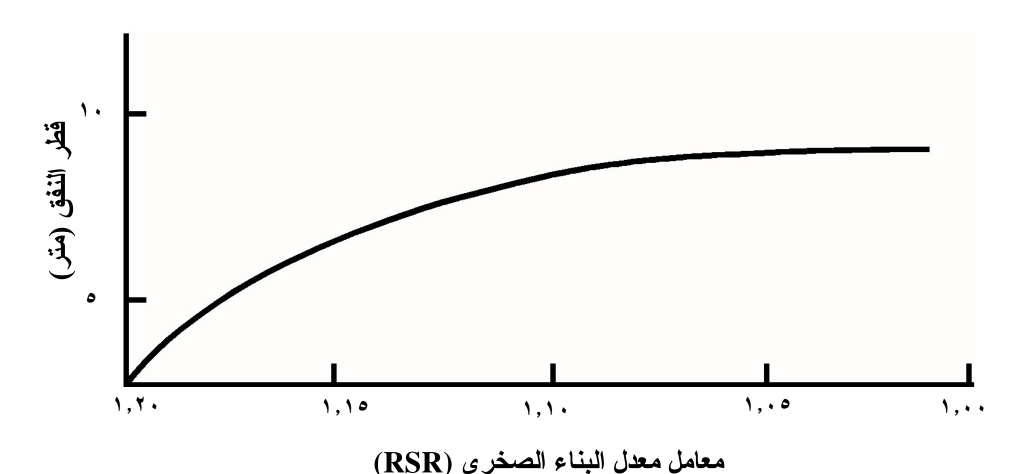
ويتم الحصول على قيمة معدل البناء الصخرى RSR بإضافة قيم ثلاث معاملات :

المعامل الأول : تقدير عام للبناء الصخرى والذى يربط نوع الصخر وكفاءة الكتلة الصخرية (Competency) ويتراوح هذا المعامل بين ٨ إلى ٣٠ .

المعامل الثانى : ويربط بين طبيعة الوصلات واتجاه سير الحفر ويتراوح بين ١٢ إلى ٥٠ .

المعامل الثالث : تقدير عام لجريان المياه الأرضية (Groundwater inflow) ويتراوح بين ٥ إلى ٢٠

وللأخذ فى الاعتبار تأثير طريقة حفر النفق وحجم النفق فإن معدل البناء الصخرى الناتج من إضافة قيم العوامل الثلاثة السابقة يتم تدقيقه (Adjustment) بإستخدام المنحنى المبين بالشكل (١٢-٤٩) وذلك للأنفاق المشقوقة بواسطة إستخدام الماكينات.



شكل (١٢-٤٩) علاقة معامل البناء الصخرى بقطر النفق

ولربط معدل البناء الصخرى RSR بمقدار السند المطلوب فإن هناك اختلافا بين أنواع نظم السند :

١- نظام السند المكون من أعصاب من الصلب : عندما تتجاوز قيمة (RSR)٧٧ فإن الحفر يكون مستقرا ولا يحتاج لنظام سند وعندما تقل قيمة RSR عن ٢٧ فإن نظام سند شامل (Extensive) يصبح ضروريا ، وبين هاتين القيمتين يختلف التباعد بين أعصاب الصلب.

٢- نظام التدعيم بإستخدام مسامير (Rock bolts) : يمكن تقدير التباعد بين المسامير ذات قطر ٢٥ مم وحمل تشغيل شد مقداره ١٠,٩ طن من المعادلة التالية :

$$\text{Spacing of bolts} = 3.3 / \sqrt{Wr} \qquad (12\text{-}38)$$

حيث

Wr = حمل الصخر (طن / م^2) ، ويكون التباعد بالأمتار

ويرتبط حمل الصخر بقيمة معدل البناء الصخرى RSR كما يتضح من الشكل (١٢-٥٠).

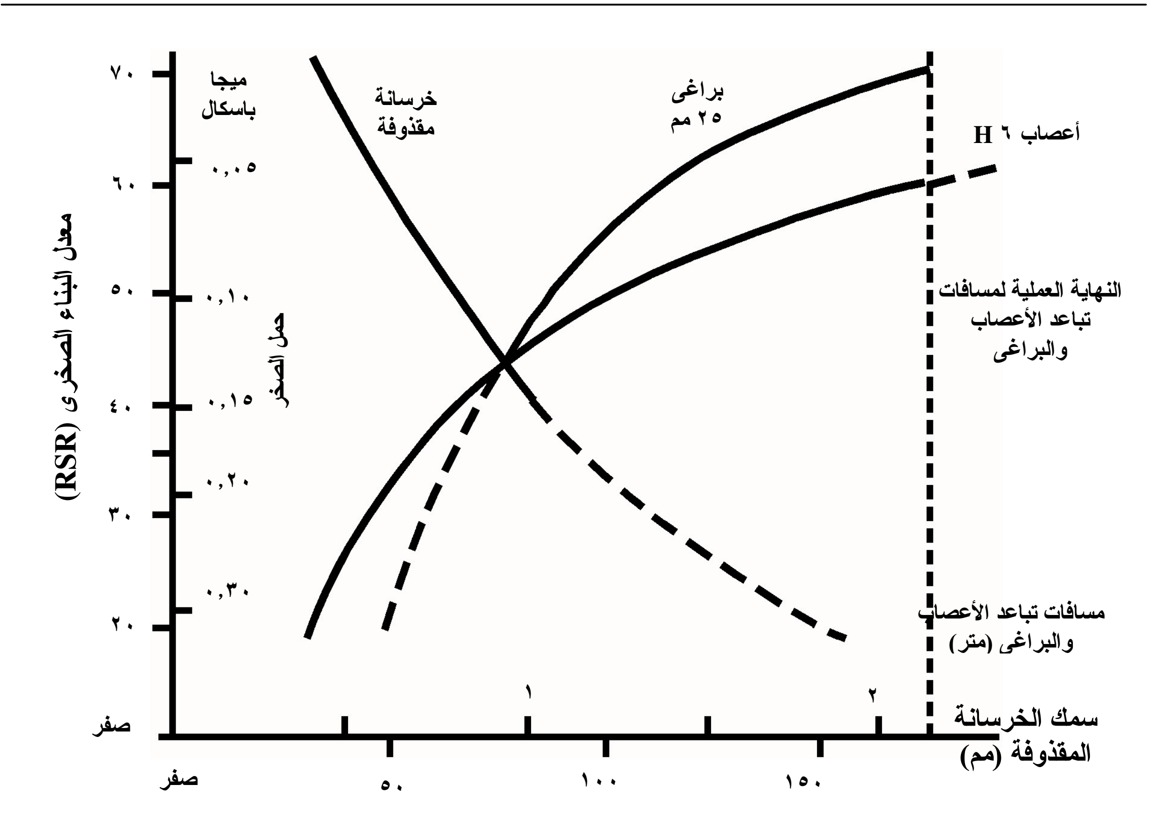
٣- نظام السند من الخرسانة المقذوفة : يمكن حساب سمك الخرسانة المقذوفة (t) بالمليمتر من المعادلة التالية :

$$t = 25 + 11\ Wr \quad \text{or} \quad t = D\ (65 - RSR) / 1.8 \qquad (12\text{-}39)$$

حيث

D = قطر النفق بالأمتار

ويوضح الشكل (١٢-٥٠) إستخدام قيم معدل البناء الصخرى RSR فى تصميم نظم السند المختلفة لنفق ذى قطر ٦ أمتار.



شكل (١٢-٥٠) معدل البناء الصخرى وتطبيقه فى سند نفق بقطر ٦ متر

د- النظام الرابع لتصنيف الصخر

يسمى هذا النظام بمعدل كتلة الصخر RMR (Rock mass rating) ويعتمد على عوامل ست رئيسية :

١- مقاومة الضغط العظمى للصخر الصحيح UCS : ويتراوح معدله بين صفر ، ١٥.
٢- مدلول نوعية الصخر RQD : ويتراوح معدله بين ٣ ، ٢٠.
٣- تباعد الوصلات : ويتراوح معدلها بين ٥ ، ٢٠.
٤- حالة الوصلة وتشمل الانفصال والاستمرارية وخشونة السطح والمواد المالئة : ويتراوح معدلها بين صفر ، ٣٠.
٥- المياه الأرضية وتقدر إما بالمياه الساريه باللتر / ثانية لطول ١٠ متر من النفق أو بنسبة ضغط مياه الوصلة إلى الإجهاد الأقصى الرئيسى : ويتراوح معدلها بين صفر ، ١٥.
٦- اتجاه الفواصل : ويتراوح معدله بين صفر ، ٦٠.

وبإضافة معدلات العوامل السابقة يمكن الحصول على معدل كتلة الصخر وقيمته العظمى هى ١٠٠ ، وبناء على القيمة المحسوبة يمكن تصنيف الصخر كما يتبين من الجدول التالى مرجع (12-7):

رقم التصنيف	وصف الصخر	RMR
I	صخر جيد جدا	٨١ - ١٠٠
II	صخر جيد	٦١ - ٨٠
III	صخر متوسط (Fair)	٤١ - ٦٠
IV	صخر ضعيف (Poor)	٢١ - ٤٠
V	صخر ضعيف جدا	أقل من ٢٠

وبناء على رقم التصنيف السابق يمكن تقرير نوعية السـند المناسبة للصخر استرشادا بالجدول التالى مرجع (12-7):

رقم التصنيف	سير الحفر	نظام السند		
		براغى الصخر	الخرسانة المقذوفة	أطقم الصلب
I	حفر كامل مقدمة النفق	لا احتياج إلى سند إلا من بعض المسامير فى نقاط متفرقة (Spot bolting)		
II	حفر كامل مقدمة النفق ونظام كامل للسند على بعد ٢٠ متر من مقدمة النفق	مسامير موضعية فى السقف بطول ٣ متر وبتباعد ٢,٥ متر وشبكة سلك إذا اقتضى الأمر	فى السقف وبسمك ٥٠ مم	لا يستخدم
III	حفر أعلى مقدمة النفق ووضع (Top heading) نظام سند بعد كل تفجير ونظام كامل للسند على بعد ١٠ متر من مقدمة النفق	نظام مسامير منتظم بطول ٤ متر وبتباعد ١,٥ - ٢ متر فى السقف والحوائط وشبكة فى السقف	فى السقف بسمك من ٥٠ - ١٠٠ مم وفى الحوائط بسمك ٣٠ مم	لا يستخدم
IV	وضع نظام السند أثناء الحفر على بعد ١٠ متر من مقدمة النفق	نظام مسامير منتظم بطول من ٤ - ٥ متر وبتباعد من ٤ - ٥ متر فى السقف والحوائط مع شبكة من السلك	فى السقف بسمك من ١٠٠ - ١٥٠ مم وفى الحوائط بسمك ١٠٠ مم	طقم خفيف من الصلب بتباعد ١,٥ متر عندما يتطلب الأمر
V	وضع نظام السند أثناء الحفر والخرسانة المقذوفة توضع مباشرة بعد التفجير	نظام مسامير منتظم بطول من ٥ - ٦ متر فى السقف والحوائط مع شبكة من السلك	فى السقف بسمك من ١٠٠ - ٢٠٠ وفى الحوائط بسمك ١٥٠ مم	طقم متوسط إلى ثقيل من الصلب بتباعد ٠,٧٥ متر

ويمكن حساب الحمل المحتمل على نظام السند من المعادلة التالية مرجع (12-5) والتى تعتمد على معدل كتلة الصخر RMR :

$$P = \frac{(100 - \text{RMR})}{100}\ \gamma\ \text{B} = \gamma\, \text{h}_t \qquad (12\text{-}40)$$

حيث

h_t = ارتفاع حمل الصخر بالمتر

B = عرض النفق

γ = كثافة الصخر (كجم / م^3)

هـ- النظام الخامس لتصنيف الصخر

يسمى هذا النظام بنظام Q ويأخذ فى الاعتبار القيم العددية للعوامل التالية :

١- مدلول نوعية الصخر RQD : وتستخدم القيمة المطلقة لهذا المدلول.
٢- رقم مجموعة الوصلات J_n (Joint set number) : ويعبر عن عدد مجموعات الوصلات فى كتلة الصخر ويتراوح بين ٠,٥ (ويمثل كتلة صخرية كبيرة بها عدد محدد من الوصلات) و ٢٠ (ويمثل الصخر المحطم (Crushed)) .
٣- رقم خشونة سطح الوصلة J_r : ويتراوح بين ٠,٠٥ للسطح الأملس و ٤ للسطح الخشن المتموج غير المتصل.
٤- رقم تغير الوصلة J_a : ويعبر عن المادة المالئة للوصلة (Infilling) ويتراوح بين ٠,٧٥ (لا توجد مادة مالئة) و ٢٠ (شريحة سميكة من الصخر المحطم المملوء بالطين).
٥- معامل التخفيض المائى للوصلة J_w : ويعبر عن وجود ماء تحت ضغط يؤثر على مقاومة القص للوصلة ويتراوح بين ٠,٠٥ (للضغط العالى) و ١ (لعدم وجود ضغط).
٦- معامل تخفيض الإجهاد SRF : ويتراوح بين ١ ، ١٥ .

ويحسب النظام Q من المعادلة التالية مرجع(12-3):

$$Q = (RQD / J_n)\ (J_r / J_a)\ (J_w / SRF) \qquad (12\text{-}41)$$

حيث يمثل

RQD / J_n حجم كتلة الصخر

J_r / J_a مقاومة القص لكتلة الصخر

J_w / SRF الإجهاد الفعال (Active stress)

وبدلالة Q يمكن حساب الضغوط الدائمة الواقعة على سطح وحوائط الحفر من المعادلات التالية مرجع (12-4):

$$P_{roof} = 2\, J_n^{(1/2)}\ Q^{(-1/3)}\ / 3\, J_r \qquad (12\text{-}42a)$$

$$P_{wall} = 2\, J_n^{(1/2)}\ Q_w^{(-1/3)}\ / 3\, J_r \qquad (12\text{-}42b)$$

حيث
Q_w (Wall factor) = ٥ ، ٢,٥ أو ١ x (Q) طبقا لقيمة (Q) المطلقة، فعندما تكون $Q > 10$ فإن
Q_w = ٥ر- x Q وعندما تكون $0.1 < Q < 10$ فإن Q_w = ٢,٥ x Q وعندما تكون $Q < 0.1$ فإن
$Q = Q_w$

ثانيا : مقارنة النظم المختلفة لتصنيف الصخر والتوصيات الخاصة بتطبيقها لتصميم الأنفاق

يمكن ربط نظم تصنيف الصخر ببعضها بإستخدام العلاقات التالية (12-52) :
معدل البناء الصخرى RSR = ٧٧ر٠ x معدل كتلة الصخر RMR + ١٢,٤ بانحراف معيارى =٨,٩
معدل البناء الصخرى RSR = ١٣,٣ لو Q + ٤٦,٥ بانحراف معيارى = ٧,٩
معدل كتلة الصخر RMR = ١٣,٥ لو Q + ٤٣,٥ بانحراف معيارى = ٩,٤

وبمقارنة أحمال الصخر المستنتجة من الأنظمة المختلفة لتصنيف الصخر بالأحمال الواقعية من الطبيعة اتضح أن نظام معدل البناء الصخرى ونظام Q يعطيان أقرب النتائج للأحمال الواقعية وخاصة نظام معدل البناء الصخرى الذى يعد أقرب النظم إلى النتائج الواقعية.

ثالثا : تأثير نظم السند فى السيطرة على السلوكيات الإنشائية للبناء الصخرى

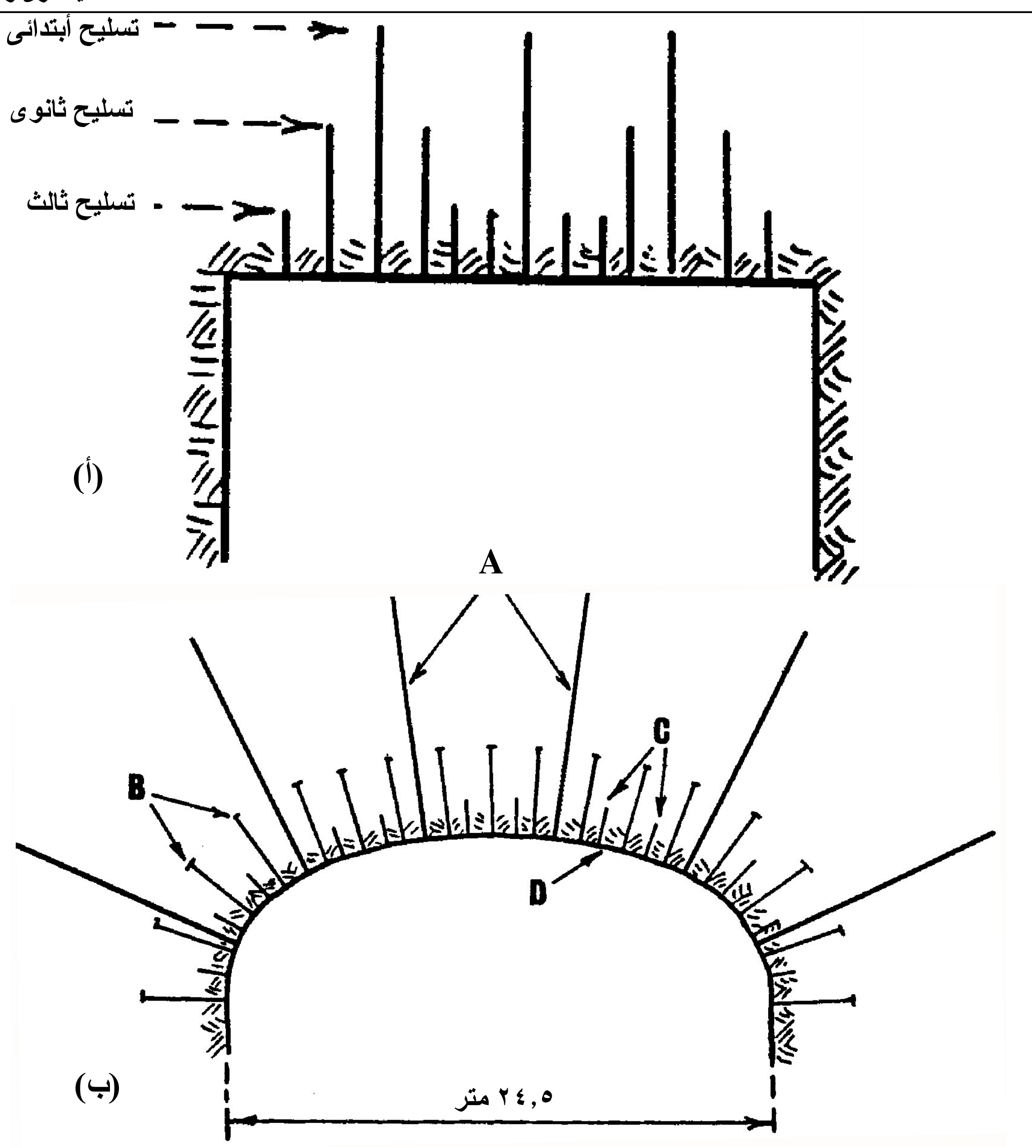
كما ذكر من قبل فإنه يوجد العديد من تقنيات السند المناسبة لكل أنواع البناء الصخرى حيث يمكن إستخدام واحدة أو أكثر من هذه التقنيات مثل مسامير الصخر والخرسانة المقذوفة وأطقم الصلب فى عملية السند. ويؤدى إستخدام النظام المناسب لطبيعة البناء الصخرى إلى تقليل التشوهات الحادثة لقطاع الحفر إلى حد كبير حتى فى الحالات التى يوجد فيها إجهادات مرتفعة فى الصخر بخلاف الإجهادات الناتجة عن الجاذبية الأرضية (أحمال الصخر). ويوضح الشكلان (١٢-٥١) ، (١٢-٥٢) أمثلة لتطبيقات نظم السند فى دعم البناء الصخرى ومشاركتها فى استقرار قطاع النفق المحفور فى مثل هذه الحالات.

١٢-١١-٤-٢ تصميم الأنفاق فى مواجهة الإجهادات المتولدة فى الصخر

عدم الاستقرار (Instability) الناتج عن الإجهادات المتولدة فى الصخر يكون عادة مصاحبا للأنفاق المحفورة فى الصخر وخاصة تلك المحفورة على أعماق كبيرة وفى صخر ضعيف نسبيا أو بالقرب من المناطق التى تم بها عمليات حفر واستخراج واسعة فى باطن الأرض ٠

أهمية مقدار واتجاه مجال الإجهادات

من الأهمية بمكان التنبأ بالإجهادات المتولدة حول محيط الحفر وتقدير مدى تأثير هذه الإجهادات على الكتلة الصخرية وبالتالى على استقرار النفق. وتبدأ هذه العملية على مسافة ما أمام مقدمة النفق وتستمر إلى موضع على بعد عدة أقطار خلف مقدمة النفق حيث تكتمل عملية إعادة توزيع الإجهادات وتكون غالبية التشوهات الأرضية قد حدثت مؤدية إلى استقرار النفق. ويعد التمثيل الرياضى لهذه العملية مع تحديد نقطة البداية ونقطة النهاية بالنسبة لمقدمة النفق أمرا صعبا وتحتاج إلى نموذج رياضى ثلاثى الأبعاد على حاسب آلى ذى قدرات عالية وتستغرق وقتا طويلا وتكون مكلفة فى نفس الوقت. ولتبسيط النموذج الرياضى ، عادة ما يفترض أن عملية إعادة توزيع الإجهادات تحدث لحظيا وبالتالى يمكن تقدير تأثير هذه الإجهادات على الكتلة الصخرية وعلى نظام السند وحساب الحالة النهائية لاتزان النفق من خلال نموذج رياضى ثنائى الأبعاد (Two dimensional plane strain problem) .



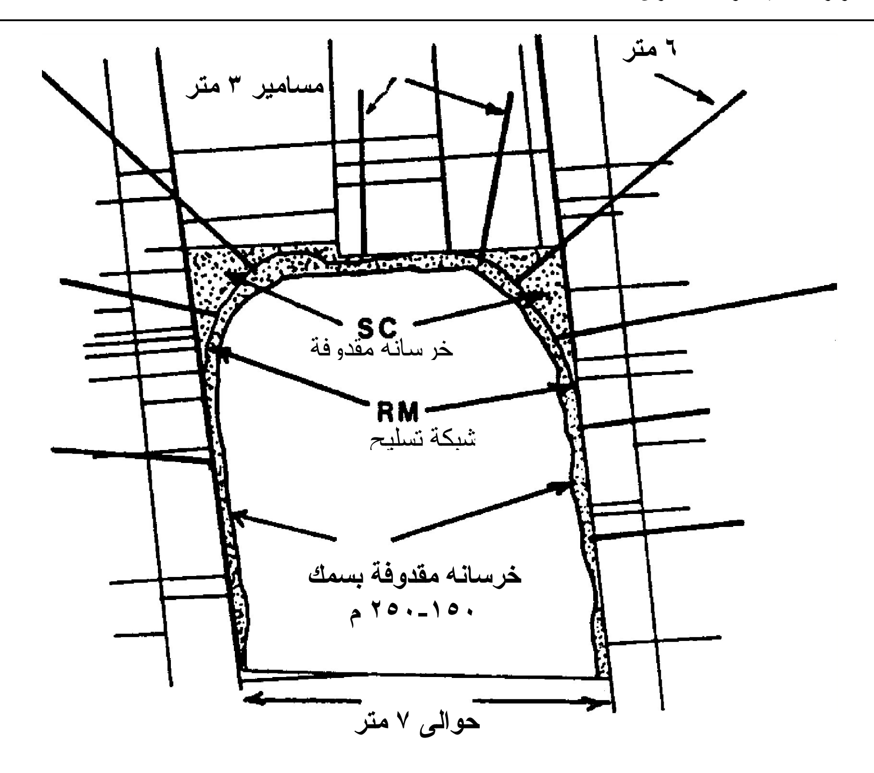
A = التسليح االإبتدائى للاستقرار العام ، شدادات بقطر ٣٦ مم وطول ١٠ - ١٢ متر مشدودة بقوة ٦٠٠ كيلو نيوتن عند تركيبها

B = التسليح الثانوى ليحافظ على الكتل الصغيرة والمتوسطة قرب السطح ، قطر ٢٥ مم ، براغى صخر من حديد عالى الخضوع بطول ٣,٧٥ متر مشدود بقوة ١٥٠ كيلو نيوتن عند تركيبها

C = التسليح الثالث لمنع تفكك السطح ولوضع الشبكة ، أشاير قطر ٢٥ مم من الصلب المطاوع بطول ١,٥ - ٢ متر مثبت بالحقين.

D = خرسانة مقذوفة بسمك من ٥٠ - ١٠٠ مم ومسلحة بشبكة من الصلب

شكل (١٢-٥١) التسليح الإبتدائى والثانوى والثالث للصخر(12-49),(12-21)



شكل (١٢-٥٢) تثبيت النفق بإستخدام الخرسانة المقذوفة فى حالة الصخر المحتوى على عديد من Discontinuities والفواصل مرجع (12-26)

وحتـى يمكـن تقديـر سـلوك الصـخر حـول الـنفق فـإن الشـكل (١٢-٥٣) يوضـح العلاقـــة العملـية (Testing) بين الإجهـــاد والانفعال للصخر المعـــرض لضغـــوط محصـــورة منخفضــة القـــيمة (Low confining pressure) حيث يمكن تمييز مناطق معينة فى سلوك الصـخر :

المنطقة AB : وتسمى الطور الخطـى (Linear phase) وتتميز بقيمة ثابتة لمعامل المرونة E (معامل يـانج) ونسبة بواسون (υ) ويمكن إستخدام نظرية المرونة لتحديد السلوك فى هذه المنطقة. وتعرف نقطة B بنقطة الخضوع (Yield point).

المنطقة BC : وتسمى طور الخضوع ويحدث فيها انفعالات لدنة وتحدد النقطة C ذروة المقاومة لمادة الصخر.

المنطقة CD : وتسمى الطـور الهش القصـف (Brittle phase) حيث يصبح الصـخر هشـا ويسقط ويصاحب ذلك تمدد حجمى (V_e) مع زيادة فى الانفعال العرضى (ε_3) نتيجة تكون فراغات فى الصخر.

المنطقة DE : وتسمى الطور اللدن ويظهر فيها ثانية السلوك المرن (Ductile behavior) ويعرف الإجهاد المصاحب لهذه المنطقة بالإجهاد الكامن وراء الانهيار (Post failure) أو الإجهاد المتبقى (Residual stress).

ويعد التحليل المرن المبسط للإجهادات وسيلة أساسية لفحص شامل لعملية إعادة توزيع الإجهادات فى الصخر بعد الحفر وبالتالى التنبؤ بالتشوهات التى يمكن أن تحدث فى كتلة الصخر. ويكون التوزيع المرن للإجهادات حول النفق غير معتمد على خصائص كتلة الصخر ويعتمد فقط على حجم وشكل قطاع النفق وأيضا حقل الإجهادات الموضعية (In-Situ) الموجودة فى التربة قبل الحفر فى اتجاه عمودى على محور النفق. ويمكن حساب الإجهادات القطرية (Radial) والمماسة (Tangential) وإجهادات القص المتولدة حول فتحة دائرية فى الصخر والمصاحبة لأى نسبة بين الإجهاد الأفقى والإجهاد الرأسى الموضعى (P_x/P_y) معادلات كيرش (Kirsch) التالية (12-3):

$$\sigma_r = \frac{(P_x + P_y)}{2}(1 - \frac{a^2}{r^2}) + \frac{(P_x - P_y)}{2}(1 + \frac{3a^2}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}) \cos 2\Theta \qquad (12\text{-}43a)$$

$$\sigma_\Theta = \frac{(P_x + P_y)}{2}(1 + \frac{a^2}{r^2}) + \frac{(P_x - P_y)}{2}(1 + \frac{3a^2}{r^4}) \cos 2\Theta \qquad (12\text{-}43b)$$

$$\tau_{r\Theta} = \frac{-(P_x - P_y)}{2}(1 - \frac{3a^2}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}) \sin 2\Theta \qquad (12\text{-}43c)$$

حيث

σ_r = الإجهاد القطرى

σ_θ = الإجهاد المماس

$\tau_{r\theta}$ = إجهاد القص

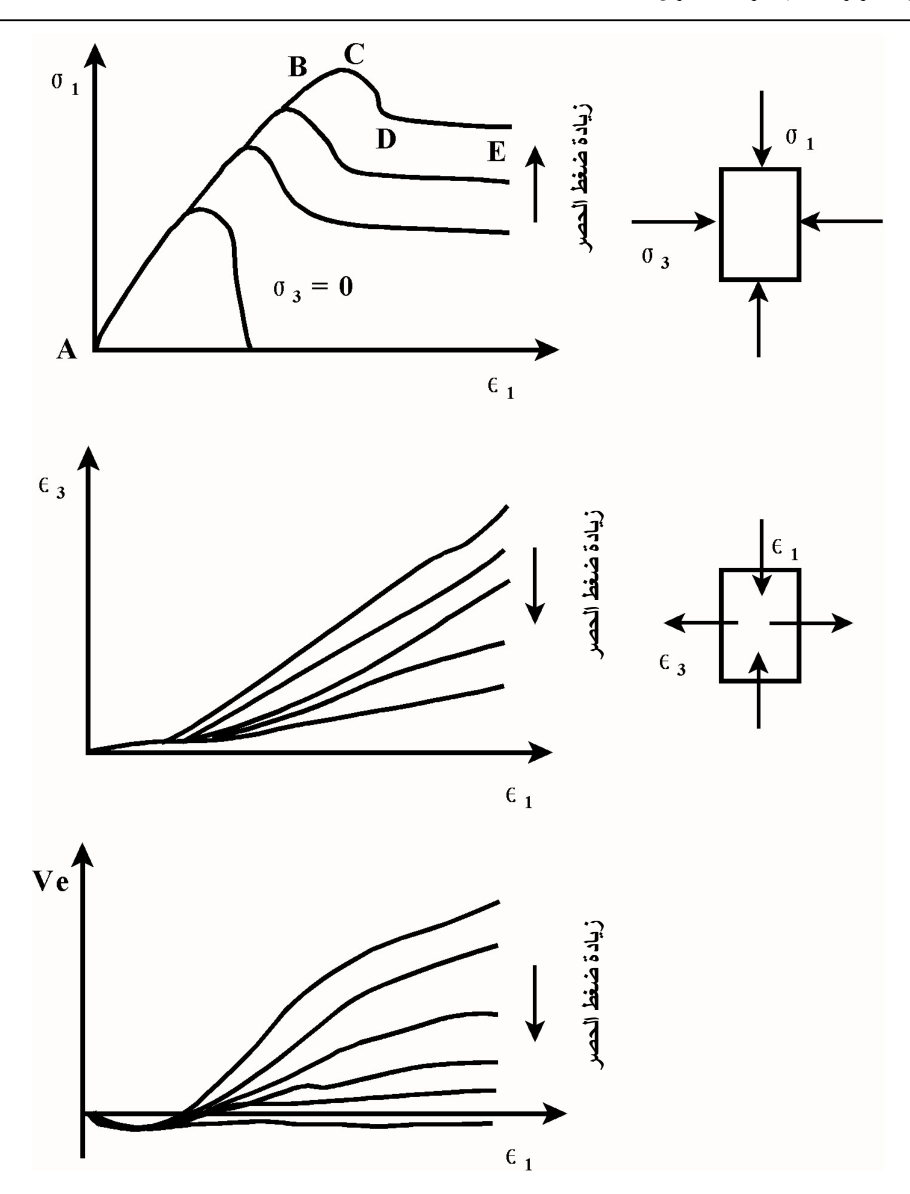
P_y , P_x = الإجهاد الأفقى المؤثر والإجهاد الرأسى المؤثر على الترتيب

a = نصف قطر الفتحة الدائرية

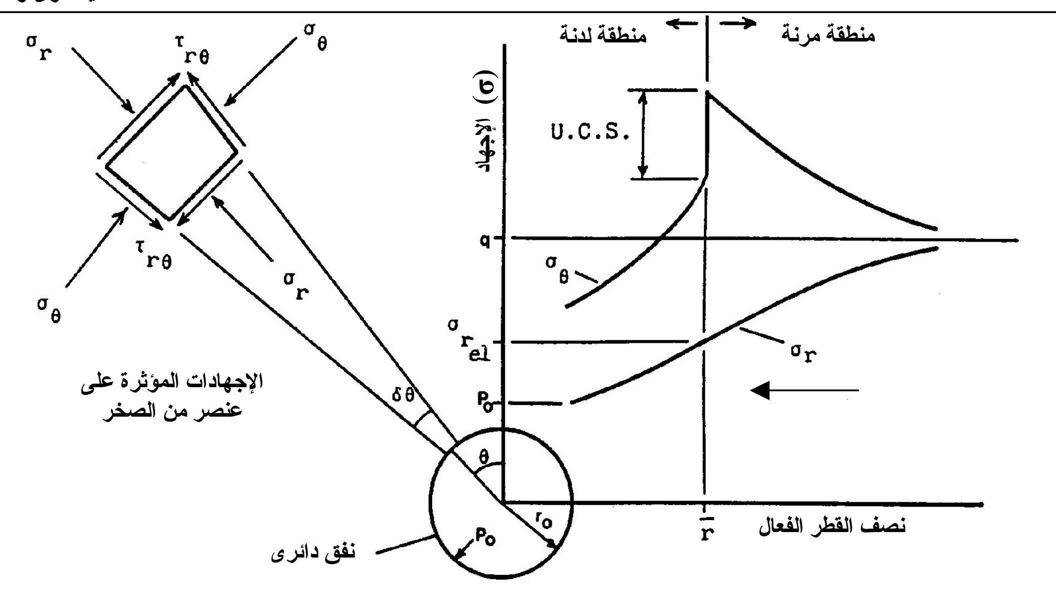
r = موضع النقطة المحسوب عندها الإجهادات فى الاتجاه القطرى

θ = زاوية ميل نصف القطر r على الرأسى

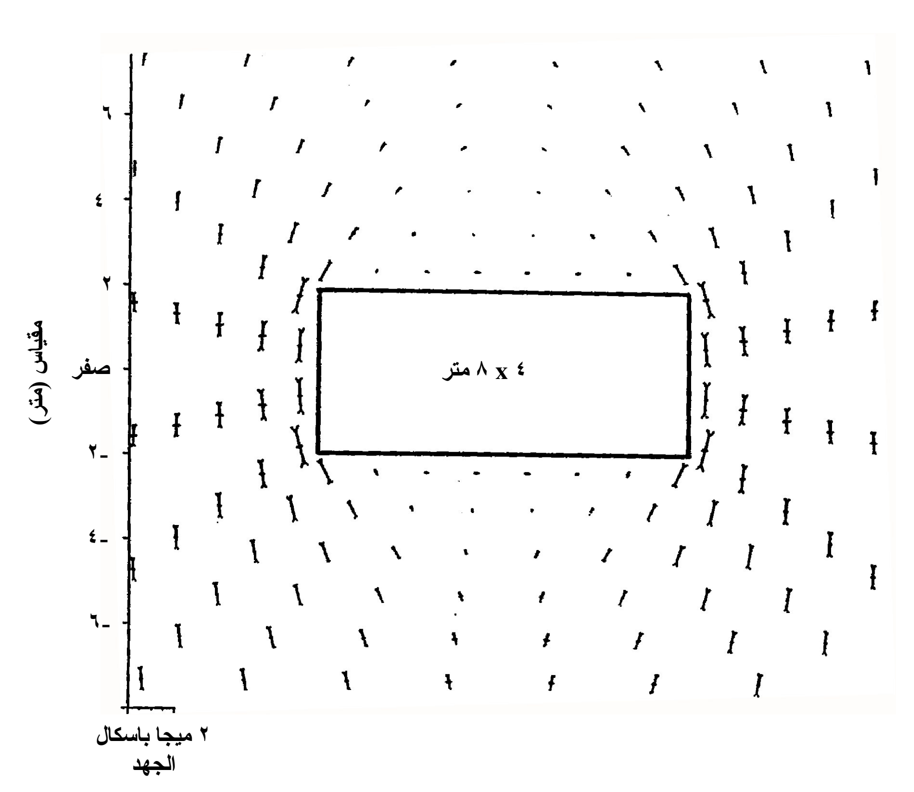
كما يمكن إستخدام الطرق العددية مثل طريقة العناصر المحددة وطريقة عناصر الحدود (Boundary element) واسعتى الإنتشار هذه الأيام فى تحليل الإجهادات حول فتحات الأنفاق. ويوضح الشكل (١٢-٥٤) مثالا لتمثيل نتائج التحليل بإستخدام هذه الطرق حول فتحة دائرية. كما يوضح الشكل (١٢-٥٥) تمثيلا مختلفا لنتائج تحليل الإجهادات حول فتحة مستطيلة حيث يتم توقيع قيم اتجاهات الإجهادات الرئيسية ويعتبر هذا التمثيل هو الأكثر شيوعا فى دراسات تصميم الأنفاق.



شكل (١٢-٥٣) تصرف الصخر تحت ظروف الإجهادات ثلاثية الأبعاد (V_e = التمدد الحجمى)



شكل (١٢-٥٤) نفق دائرى معرض لإجهادات فى اتجاهين مرجع (12-1)



الإجهادات الرئيسية (تحميل بوزن التربة) العمق ٢٤ متر
شكل (١٢-٥٥) نتائج تحليل الإجهادات بإستخدام العناصر المحددة مرجع (12-3)

١٢-١١-٤-٣ سلوك الكتلة الصخرية Rock Mass Behavior

معرفة سلوك الكتلة الصخرية حول الحفر يعد من أهم سمات تصميم الأنفاق. وللوصول إلى توصيف سليم لهذا السلوك فإنه يجب الانتباه إلى الاعتبارات التالية :

١- غالبية الإختبارات المعملية للصخر تتم على عينات سليمة خالية من الشروخ والعيوب ومعده بالشكل والحجم المطلوبين.

٢- الانهيار الذى يحدث فى العينات الأسطوانية من الصخر والمحصورة بين فكى ماكينة الإختبار هو انهيار غير واقعى بالنظر إلى انهيار الصخر فى الطبيعة. فانهيار القص الملاحظ لهذه الأسطوانات هو نتيجة هيئة وترتيب الإختبار ولا يعكس بالضرورة الإجهادات الحقيقية المؤثرة على الصخر فى الطبيعة.

٣- نتيجة للطبيعة العشوائية للطبقات والوصلات فلا يمكن إعداد نموذج يمثل تمثيلا كاملا الكتلة الصخرية. كما أن خواص الكتلة الصخرية تتغير بالنظر إلى القرب أو البعد عن الوصلات وباتجاهات هذه الوصلات.

٤- الانهيار فى كتلة الصخر المحتوية على عدد من الفواصل يكون عادة بانزلاق القص على المستويات الضعيفة الموجودة فى هذه الكتلة وليس بالضرورة على مستويات انهيار جديدة كما يحدث فى الإختبارات المعملية على عينات من الصخر. ولكن فى حالة كتلة الصخر الكثيفة المحتوية على عدد محدود من الوصلات فمن الممكن تولد مستويات انهيار ضعيفة جديدة.

٥- المقاومة الكلية لكتلة الصخر تقل جوهريا عن المقاومة المحسوبة من الإختبارات المعملية على عينات منتقاة من الصخر وأيضا يقل معامل يانج المعين بواسطة الإختبارات عن المعامل الحقيقى لكتلة الصخر.

وبالتالى فإن الحصول على نموذج يمثل السلوك الحقيقى لكتلة الصخر يعد أمرا مشحونا بالصعوبات مما يجعل التنبؤ بتشوهات الصخر نتيجة إعادة توزيع الإجهادات بعد الحفر صعبا للغاية.

١٢-١١-٤-٤ الطرق غير العددية لتصميم الأنفاق

تعد الطرق التجريبية لتصميم الأنفاق فى الكتل الصخرية المعرضة لضغوط منخفضه وسيلة ناجحة حتى اليوم بالرغم من توافر نماذج التصميم الحديثة بإستخدام الحاسبات الآلية والتطورات التى شهدتها هذه النماذج. ولعل إستخدام نماذج بمقياس هندسى (Scaled models) فى تصميم الأنفاق من أهم الطرق التجريبية والتى يتم فيها الاقتراب الشديد من هيئة النفق الهندسية والظروف الجيولوجية المحيطة به وذلك بإستخدام المادة الأصلية للصخر أو مادة بديلة مقبولة لتصنيع النموذج. ويمكن تعريض هذا النموذج للأحمال التى تولد الإجهادات الموضعية الحقيقية فى التربة وبالتالى يمكن تقدير مدى استقرار النفق. ويجب الأخذ فى الاعتبار النقاط التالية عند إستخدام النماذج الطبيعية فى تصميم الأنفاق :

١- إذا ما استخدمت مادة بديلة للصخر فى بناء النموذج فإن خواص هذه المادة قد تختلف جذريا عن خواص الصخر ، لذلك فإن المقياس الهندسى للنموذج يجب أن يختار إعتمادا على خاصية رئيسية واحدة مثل المقاومة أو التشوه أو غيرها.

٢- إستخدام نظام سند ملائم للمقياس الهندسى الذى استخدم فى النموذج ، وإذا كان نظام السند بإستخدام مسامير الصخر (Rock bolting) فإن عناية كافية يجب أن توجه إلى تمثيل هذا النظام فى النموذج.

٣- الإستخدام الأمثل للنموذج يتركز أساسا فى تمثيل ظروف التربة بعد حفر النفق بحيث يمكن تحديد المنطقة التى تتأثر بالحفر وبالتالى اقتراح العلاجات اللازمة للسيطرة على عدم استقرار التربة فى هذه المنطقة.

وقد أثبتت النماذج الهندسية للأنفاق نجاحا كبيرا فى تصميم الأنفاق وفى الدراسات البارامترية على سلوك هذه الأنفاق وذلك فى كل من الصخور الكثيفة والكتلة الصخرية ذات الطبقات.
كما يمكن إختيار العناصر الإنشائية وطريقة الحفر ، خاصة لنظام السند الابتدائى للنفق (Preliminary support) إعتمادا على الخبرة السابقة وبعض الاعتبارات التجريبية التى تعتمد على الملاحظة أكثر من إعتمادها على الحسابات العددية. ويكون هذا الأسلوب منطقيا إذا ما كانت الخبرات من مشروعات أنفاق سابقة ناجحة يمكن تطبيقها على مشروع نفق جديد مماثل سوف يتم تصميمه. ويكون هذا التطبيق مبررا فقط عندما تتوافر الشروط التالية :

١- ظروف الأرض بما فيها المياه الأرضية متشابهة.
٢- أبعاد النفق وشكل قطاعه متماثلة.
٣- عمق التربة أعلى النفق متساو تقريبا.
٤- طريقة حفر النفق واحدة.
٥- القياسات التى تتم فى الطبيعة تعطى نتائج متشابهة مع تلك الخاصة بالأنفاق السابقة.

وبضم الطرق التحليلية (Analytical methods) مع الأسلوب التجريبى (Empirical methods) بالإضافة إلى التفسير الفورى لنتائج القياسات الحقلية فإن أسلوبا لتصميم الأنفاق يتم تعديله وضبطه مع تقدم حفر النفق يمكن تطبيقه. وفى هذا الأسلوب فإن القياسات الحقلية الخاصة بالتشوهات والازاحات والإجهادات فى التبطين يمكن إستخدامها فى التحقق من تصميم النفق أو تعديل التصميم. وتلعب قطاعات النفق المزودة بأجهزة قياس عديدة فى المراحل الأولى من تنفيذ النفق دورا رئيسيا فى توفير المعلومات اللازمة لهذا الأسلوب. ولتطبيق هذا الأسلوب والمسمى بطريقة الرصد لابد من تحقق الشروط التالية :

١- عملية حفر النفق يجب ضبطها على طول محور النفق.
٢- الإتفاق بين المالك والمقاول فى شروط التعاقد على السماح بتعديل النفق طبقا للقياسات المأخوذة أثناء التنفيذ.
٣- يجب تفسير نتائج القياسات الحقلية على أساس تحليلى سليم.
٤- إستخدام تفسير نتائج القياسات الحقلية للقطاعات المزودة بأجهزة القياس لاستنتاج سلوك القطاعات الأخرى من النفق.
٥- توافر القياسات الحقلية على كامل طول النفق للتأكد من صحة سلوكه المفترض مسبقا.

١٢-١١-٥ القياسات الحقلية

١٢-١١-٥-١ الغرض من القياسات الحقلية

تعد القياسات الحقلية أثناء الحفر وعلى فترات أطول بعد إتمام النفق جزء متمما للتصميم ليس فقط للتأكد من الأمان الإنشائى للنفق وصحة نموذج التصميم ولكن أيضا للتحقق من رد فعل التربة المفترض وجدوى نظام السند المستخدم. ويمكن تلخيص الأهداف الرئيسية للقياسات الحقلية فيما يلى :

١- التحكم فى تشوهات النفق وتأمين وضبط قطاع النفق.
٢- التحقق من أن طريقة حفر النفق المناسبة قد تم إستخدامها.
٣- التحكم فى الهبوط عند سطح الأرض ومعرفة الجزء من ذلك الهبوط الذى يرجع إلى تخفيض منسوب المياه الأرضية.
٤- قياس تطور الإجهادات فى العناصر الإنشائية للتأكد من كفاية مقاومتها أو احتمال تعرضها للانهيار.
٥- إظهار التشوهات المتقدمة (Progressive) والتى تتطلب إجراء فوريا بصدد تقوية التربة أو نظام السند.

١٢-١١-٥-٢ طرق القياسات الحقلية

يتضمن برنامج القياسات الحقلية للتشوهات والإجهادات أثناء الحفر القياسات التالية شكل (١٢-٥٦) :

١- رصد منسوب قمة النفق من داخله بأسرع ما يمكن حيث أن جزءا صغيرا من الحركة الكلية لقمة النفق هى التى يمكن قياسها بسبب أن الجزء الأكبر من هذه الحركة يحدث قبل تثبيت جهاز الرصد. وتتراوح المسافة بين القراءات المتتالية من ١٠ - ١٥ متر.

٢- قراءات التقارب (Convergence readings) على شكل مثلثات (K) فى الشكل (١٢-٥٦) يجب أن تكون هى الطريقة المستخدمة للمعلومات المبكرة حيث تستخدم بسهولة وبدقة تصل إلى ١ مم.

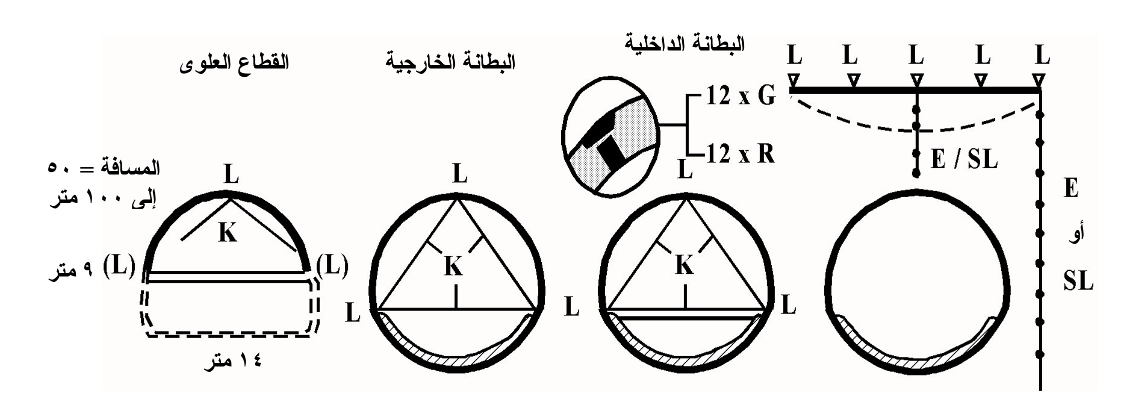
٣- يزود عدد محدود من القطاعات فى التبطين بخلايا إجهاد (Stress cells) لقراءة ضغط الأرض والقوى الحلقية (Ring forces) فى التبطين (R , G) فى الشكل (١٢-٥٦).

٤- توضع خلايا الإجهاد أيضا فىعدد محدود من القطاعات من التبطين النهائى إذا ما أريد أخذ قراءات على المدى الطويل بعد إتمام النفق.

٥- رصد مناسيب السطح السطحى على طول محور النفق وفى الاتجاه المتعامد عليه يعطى الهبوط والارتباط بالقياسات داخل النفق.

٦- تركيب أجهزة القياس (Extensometers, inclinometers, sliding micrometers) على السطح أمام مقدمة النفق للحصول على قياسات تشوهات التربة كما يتضح من الشكل (١٢-٥٦) حيث يساهم رصد تشوهات التربة فى التأكد من صحة تصميم النفق. وتكون هذه الأجهزة مصحوبة بخلايا الإجهاد فى نفس القطاعات.

وتتوقف تكرارية أخذ القراءات على المسافة من مقدمة النفق التى تؤخذ عندها القراءات وأيضا على نتائج هذه القراءات. فعلى سبيل المثال يمكن أخذ القراءات مرتين يوميا فى البداية ثم يتم خفضها إلى مرة واحدة كل أسبوع على مسافة مساوية لأربعة أمثال قطر النفق خلف مقدمة النفق ثم تخفض فى النهاية إلى قراءة واحدة كل شهر إذا ما بررت منحنيات القراءات مع الزمن مثل هذا التخفيض.



E = جهاز قياس التغير فى الطول
L = الرصد السطحى
R = القوى فى الحلقات
G = ضغط الأرض
K = التقارب
SL = ميكروميتر منزلق

شكل (١٢-٥٦) مثال للقياسات الحقلية لحفر النفق ، البطانة الابتدائية ، ولهبوط سطح الأرض

١٢-١١-٥-٣ تفسير نتائج القياسات الحقلية

يجب تفسير نتائج القياسات الحقلية بالنظر إلى خطوات الحفر ، الأداء الإنشائى لنظام السند ، والتصميم الإنشائى لنموذج النفق مع اعتبارات الأمان اللازمة. وعادة ما تكون القراءات مشتتة القيم (Scatter of value) وخاصة بالنسبة لقراءات الإجهادات حيث أن الإجهادات والانفعالات تكون ذات سمات محليةجدا (موضعية) بينما تكون قراءات التشوهات والازاحات ذات ثقة أكبر (More reliable) وعموما فإن تفسير القياسات الحقلية يجب أن يأخذ فى الاعتبار ما يلى :

١- يجب أن تبرهن نتائج القياسات عما إذا كانت طريقة حفر النفق مناسبة أو غير مناسبة.
٢- المنحنيات المرسومة بين التشوهات والزمن قد توضح انخفاض معدل التشوهات أو عدم وجود خطر الانهيار.
٣- التناقضات الكبيرة بين التشوهات المقاسة عمليا والمحسوبة نظريا قد تتطلب إعادة مراجعة نموذج تصميم النفق. ولكن هذه التشوهات المقاسة تعبر عن الحالة الواقعية فقط فى المكان والزمن الذى قيست فيه بينما التأثيرات على المدى الطويل مثل ارتفاع منسوب المياه والاهتزازات الناتجة عن حركة المرور والزحف لا تسجل أثناء الحفر.
٤- قد تغطى القراءات جزء فقط من الظاهرة المقاسة إذا ما تأخر تركيب أجهزة القياس.
٥- يمكن اعتبار النفق فى حالة استقرار عندما تتوقف جميع القراءات عن الزيادة ، ومع ذلك لا يمكن استنتاج هامش أمان (Safety margin) ضد الانهيار (خاصة الانهيار المفاجئ) من القياسات إلا عن طريق الإستكمال بالإستقراء Extrapolation .

١٢-١٢ المراجع

1. Anonymous, "Handbook of underground Drilling". Tamrock, Tamrock Drills, Tampere, Finland, 328p, (1986).
2. Anonymous, "Explosives in Tunnelling and shaft sinking'. Nabel's Explosives Company Limited, Stevenston, Hyrshire, Scotland, 12p.
3. Barry, N. Whittaker and Russell, C. Frith, "Tunnelling Design, Stability and Construction", The Institutions of Mining andn Metallurgy, 44 Portland Place London, W., England, (1990).
4. Barton, N. Lien, R., and Lunde, J., "Estimation of Support Requirements for Underground Excavations", Proc. 16th US Symp., on Rock Mechanics Design Methods in Rock Mechanics, pp.163-177, (1977).
5. Bawer, G., "How to Control Groundwater in Tunnelling Projects", Tunnels and Tunnelling , June,17, pp.55-57, (1985).
6. Bickel, J.O., and Keusel, T.R."Tunnel Engineering Handbok ". Van Nostrand Reinhold Companym 670p, (1982).
7. Bieniawski, Z.T., "Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling", A. A., Balkema, 27p, (1984).
8. British Standards Institution B56164 Code of Practice for safety in Tunnelling in the construction Industry, (1982).
9. British Standards Institution. DD81 Draft for Development: Recommendations for Ground Achorage, (1981).
10. Brown, E.T., "Analytical and computational Methods in Rock Mechanics", Allen and Unwin, Chap-1, pp. 1-13, (1987).
11. Brown, E.T., and Hock, E., "Trends in Relationships Between Measured in Situ Stresses and Depth", Technical Note, Int., Jour, Rock Mech., and Min. Sci., and Geomech. Abstr., 15,pp.211-215, (1978).
12. Broms, B.B., and Bennermak, "Stability of Clay at Vertical Openings", J. Soil Mech., and Foundation Div., Proc., ASCE, Vol.93, SMI, pp. 71-94, (1967).
13. Casarin, C., and Mair, R.J.,"The Assessment of Tunnel Stability in Clay by Model Tests, in Soft Ground Tunnelling Failure and Displacements", Eds., Resendiz and Romo, Balkema, pp.95-103, (1981).
14. Clough, G.W., "Development of Design Procedures for Stabilised Soil Support Systems for soft Ground Tunnelling" , Vol.I, Report to USDOT, (1977).
15. Coomber, D.B.,"Tunnelling and Soil Stabilization by Jet Grouting", Tunnelling '85, IMM, London, pp. 277-283, (1985).
16. Craig, R.N., and Nuir Wood, A.M.,"A Review of Tunnel Linning Practice in the U.K.", TRRL Supplementary Report, No.335, 211p. (1978).

17. Curtis, D.J., “Discussion of Reference (12-38)”, Geotechnique, 26, (1), pp. 231-237, (1976).
18. Daws, G., “Resin Rock Bolting”, Civil Engineering, 74, Nov., pp.39-43, (1979).
19. Deere, D.U., Peck, R.B., Parker, H., Mansees, J.E., and Schmidt, B., “Design of Tunnel Supports Systems”, Highway Research Record no. 339, pp.26-33, (1970).
20. Deere, D.U., “Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes”, Rock Mech., and Eng. Geology, Vol-1, No.1, pp. 17-22, (1964).
21. Douglas, T.M., and Arthur, L.J., “A Guide to the Use of Rock Reinforcement in Underground Excavations”, CIRIA Report No. 101, 74p., (1983).
22. Edeling, H., and Maidl, B.”Tunnelling Support Methods and their possible Application to Machine Rock Face Excavation in Coal Mining; In : Euratunnel ’80, pp.120-129, Ed. M.J. Jones, IMM, London, 156 p. (1980).
23. “Egyptian Code of Practice for the Design and Construction of Reinforced Concrete Structures” Research Center for Housing, Building and Physical Planning, Egypt, 1995.
24. Evans, I., “A Theory on the Basic Mechanics of Coal Ploughing, Proc. Int. Symp. of Min. Res., vol 2, London, porgamon press, pp361, (1962).
25. Farmar, I.W., and Shelton, P.D.,”Factors That Affect Underground Rock Boit Reinforcement Systems Design”, Trans. IMM, Section A, April, A68-83, (1980).
26. Fowell, R.I., and McFeat-Smith, I., “Factors Influencing the cutling performance of a selective Tunnelling Machine, Tunnelling ’76, IMM, Ed.M.J. Jones, pp.301-309, (1976).
27. Heinz Duddeck, “Guidelines for the Design of Tunnels”, ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels, Tunnelling and underground space Technology, Vol.3, No.3, pp. 237-249, (1988).
28. Henneke, J., and Kubier, H., “Ergebnisse, Erfahrungen and Entwicklungstendenzen Being Einsatz Von, Tunnelbohrmaschinen in steinkohlenbergbau, pp145-192, (1981).
29. Ischy, F., and Glossop, R., “An Introduction to Alluvial Grouting Theory and Practice, Developments in Geotechnical Engineering, No.57, Elsevier, 250p.(1989).
30. Jhan, J.G., “Tunnel Boring Machines; In: Tunnel Engineering Handbook, Chapter 10, pp. 235-278 Eds. J.O.Bickel and T.R.Kuesel, Van Nastrand, 670 p, (1983).
31. Jones, M.B., “Dewatering For the well-Being of Tunnelling”, Tunnels and Tunnelling, May, 17, pp. 46-48 (1985).

32. Kogelmann, W.J. and Schenck, G.K.,"Recent North American Advances in Boon-Type Tunnelling Machines", Tunnelling '82, IMM, Ed. M.J. Jones, pp.205-215, (1982).
33. Kuesel, T.R., "Principles of Tunnel lining Design", Tunnels and Tunnelling, April, 19, pp.25-28, 1987.
34. Mair, R.J., "Centrifugal Modelling of Tunnel Construction in Soft Caly," Ph.D. Thesis, Cambridge University, (1979).
35. Mather, W., "Design Principles of a Tunnel Excavation Using Explosives", Symp. Aspects of Tunnelling , South Wales Institute of Mining Engineers, 15p, (1975).
36. Mayo, S.R.,"Shield Tunnels; In : Tunnel Engineering Handbook", Chapte 6, pp93-122, Eds. J.O.Bickel and T.R.Kuesel, Van Nostrand, 670p, (1982).
37. McCusker, T., Soft Ground Tunnelling, In: Tunnel Enginnering Handbook", Hand book", Eds. J.O.Bickel and T.R. Keusel, Van Nostrand Reinhold Company, 670p, (1982).
38. Morgan, H.G., "A Contribution to the Analysis of Stress in a Circular Tunnel", Geotechnique, 11, pp.37-46, (1961).
39. Morris, A.H., "Practical Results of Cutting Mine Tunnels", Tunnelling'85, IMM, Ed. M.J. Jones, pp.173-177, 91985).
40. Muir wood, A.M., "The Circular Tunnel in Elastic Ground", Geotechnique, 25 (1), pp.115-127, (1975).
41. Muir Wood, H.M., "Soft Ground Tunnelling", Proc. Symp. on Technology and potential of Tunnelling, Johannesburg, Vol.1, pp.167-174, Vol.2, pp.72-75, (1970).
42. O'Reilly, M.P., "Evaluating and Predicting Ground Settlements Caused by Tunnelling in London Clay", Tunnelling '88, IMM, London, pp.231-241, (1988).
43. O'Reilly, M.R., and New, B.M."Settlement Above Tunnels in the UK: Their Magnitude and Prediction", Tunnelling '82, IMM, London, pp.173-181, (1982).
44. O'Rourke, T.D., "Guidelines for Tunnel Lining Design ", ASCE, 82p., (1984).
45. Parkes, D.B., "The Performance of Tunnel Boring Machine in Rock, CIRIA Special Publication 62, 56p. (1988).
46. Peck, R., "State of the Art Report: Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground", 7th Int. Conf. on Soil Mech., and Foundation Eng., Mexico City, State of the Art, Vol.1, pp.225-290, (1969).
47. Raffle, J.F., and Greenwood, D.A., "The Relation Between the Rheological Characteristics of Grouts and their capacity to Permeate Soil", Proc. Int. Conf. On Soil Mech, and Field Eng., vol.2, pp. 289-293, (1961).

48.Raffoux, J.F., and Dejean, M.I., "Rock Bolting and Time Dependent Behaviour of Strata", Tunnelling '79, IMM, London, pp.175-181, (1979).
49.Rose, D., "Steel Fibre Reinforced Shotcrete for Tunnel Linings", Tunnels and Tunnelling, May, 18, pp.39-44, (1986).
50.Roxborough, F.F., and Phillips, H.R., "Rock Excavation by Disc Cutter, Int.J.Reck Mech. Min, Sci-& Geomech Abstr., 12, pp.361-366 (1975).
51.Roxborough, F.F., "Cutting Rock with Picks", The Mining Engineers, 132 (153), June pp.445-452,(1973).
52.Rutledge, J.C., and Preston, R.L.,"New Zealand Experience with Engineering Classifications of Rock for the Prediction of Tunnel Support", Proc., Conf., Tunnelling Under Difficult Conditions, Tokyo, pp.23-29, (1978).
53.Schmidt, B., "Tunnel Linning Design : Do the Theories Work?", Proc. 4th Australian-New Zealand Conf., on Geomechanics, Aus. Ins., of Engrs., Perth, Vol.2, pp.682-693, (1984).
54.Singh, A., and Mitchell, J.K.,"Creep Potential and Creep Rupture of Soils", 7th Int. Conf., on Soils", 7th Int., Conf., on Soil Mech., and Foundation Eng., Mexico city, Vol-1, pp. 379-384m (1969).
55.Spanyler, M.G. and Handy, R.L., "Soil Engineering", 4th Edition, Harper and Raw, New York, 819p., (1982).
56.Szechy, K., "The Art of Tunnelling", Akadeniai Kiado, Budapest, 891p, (1966).
57.Terzaghi, K., "Rock Defects and Loads on Loads on Tunnel Supports ; In: Rock Tunnelling with steel supports", Eds. R. V. Proctor and T. White, Commercial Shearing Co., Ohio, pp. 15-99, (1946).
58.Tough, S.G., and Noskiewicz, E.M., "Performed Lining in Tunnelling Practive", RETC Proc., Vol.1, pp.643-667, (1974).
59.Unal, E., "Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs", Ph.D. Thesis, Pennsylvania state University, (1983).
60.Whittaker, B.N., and Blades, M.J.,"Resin Based Reinforcement", Int. Soc. For Rock Mechanics, Symp on protection Against Rock Falls, Katowice, 23p, (1973).
61.Wichham, G.E., Tiedmann, H.R., and Skinner, E.H.,"Support Deter mination Based on Geologic Predictions", Proc., 1st Rotc, AIME, pp.43-36, (1972).
62.Wilbur, L.D., "Rock Tunnels; In: Tunnel Engineering Handbook", Chapter 7, pp.123-207, Eds.J.O.Bickel and T.R. Kuesel, Van Nostrand, 670 p, (1982).

ملحق م-١ : خرسانة المنشآت المائية

م-١-١ تعريف
خرسانة المنشآت المائية يجب أن تكون خرسانة من الدرجة الأولى وهى خرسانة كثيفة غير منفذة للمياه ولها قدرة عالية على مقاومة الاجهادات المختلفة ومقاومة حركة التمدد والانكماش نتيجة دورة البلل والجفاف.

م-١-٢ مكونات خرسانة المنشآت المائية
تتكون خرسانة المنشآت المائية مثل الخرسانة المسلحة من المواد الآتية :
أ- الركام بنوعيه الصغير والكبير.
ب- الأسمنت.
ج- ماء الخلط والمعالجة.
د- الإضافات.
هـ- حديد التسليح.

م-١-٣ خواص مواد خرسانة المنشآت المائية

م-١-٣-١ الركام
ينقسم الركام المستخدم فى الخرسانة إلى نوعين رئيسيين :
أ- ركام من المصادر الطبيعية.
ب- ركام صناعى.

ويرجع فى الخواص التى يجب توافرها فى الركام بنوعيه إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية وإلى المواصفة القياسية المصرية (م.ق.م ٩ . ١١ / ١٩٧١ ركام الخرسانة من المصادر الطبيعية - وتعديلاتها) والصادرة عن الهيئة المصرية للتوحيد القياسى.

م-١-٣-٢ الأسمنت
يكون الأسمنت المستخدم فى خرسانة المنشآت المائية من النوع البورتلاندى العادى أو سريع التصلد أو المقاوم للكبريتات أو أى نوع أخر ويرجع فى الخواص التى يجب توافرها فى الأسمنت المستخدم إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية وإلى المواصفات القياسية المصرية التالية :

م.ق.م. ٣٧٣ / ١٩٩١ الأسمنت البورتلاندى العادى وسريع التصلد
م.ق.م. ١٤٥٠ / ١٩٧٩ الأسمنت البورتلاندى العادى فائق النعومة(٤١٠٠)
م.ق.م. ٩٧٤ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى الحديدى
م.ق.م. ٥٨٣ / ١٩٩٣ الأسمنت البورتلاندى المقاوم للكبريتات
م.ق.م. ٥٤١ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى منخفض الحرارة
م.ق.م. ١٠٣١ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى الأبيض
م.ق.م. ٢١٤٩ / ١٩٩٢ الأسمنت البورتلاندى متوسط الحرارة
م.ق.م. ١٩٩٥/٢٧٩٦ الأسمنت عالى خبث الحديد
م.ق.م. ١٩٩٥/٢٧٩٧ الأسمنت عالى المقاومة للكبريتات
م.ق.م. ١٩٤٧ / ١٩٩١ طرق أخذ عينات الأسمنت

م.ق.م. ٢٤٢١ اختبار الخواص الفيزيقية والميكانيكية للأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الأول : تعيين زمن شك الأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الثانى : تعيين نعومة الأسمنت
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الثالث : اختبار مقاومة الأسمنت للضغط
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الرابع : تقدير ثبات حجم الأسمنت (التمدد) بطريقة الأوتوكلاف
م.ق.م. ٢٤٢١ / ١٩٩٣ الجزء الخامس : تقدير ثبات حجم الأسمنت (التمدد) بطريقة لوشاتلييه
م.ق.م. ١٩٩٨/٣٣٧٥ المواصفات الفنيه لتخزين الأسمنت واحتياطات التعامل مع الأسمنت

م-١-٣-٣ ماء الخلط والمعالجة

يكون الماء المستعمل فى خلط الخرسانة نظيفا وخاليا من المواد الضارة مما قد يؤثر تأثيرا متلفا على الخرسانة أو صلب التسليح ويعتبر الماء الصالح لخلط الخرسانة المسلحة للمنشآت المائية صالحا للاستعمال فى معالجة هذه الخرسانة. ويرجع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية لمعرفة الخواص والصفات الواجب توافرها فى ماء الخلط والمعالجة.

م-١-٣-٤ الإضافات

الإضافات هى مواد تضاف للخلطات الخرسانية بكميات صغيرة جدا وذلك لتحسين خواص معينة للخرسانة أو إكسابها خواصا فى الإستخدام جديدة. وتعتبر الإضافات الأكثر شيوعا فى الإستخدام هى إضافات تعجيل التصلب ، تأخير التصلب ، تخفيض المياه وتحسين قابلية التشغيل ، تخفيض المياه وتعجيل التصلب ، تخفيض المياه وتأخير التصلب ، وإضافات الهواء المحبوس وغيرها. وللتعرف على اشتراطات وخواص الإضافات فى خرسانة المنشآت المائية يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية وإلى المواصفات القياسية المصرية التالية :

م.ق.م. ١٨٩٩ إضافات الخرسانة
م.ق.م. ١٨٩٩ / ١٩٩٠ الجزء الأول : الإضافات المخفضة للماء والإضافات المعجلة للشك والإضافات المؤخرة للشك.

م-١-٣-٥ حديد التسليح

تستخدم فى تسليح خرسانة المنشآت المائية أسياخ صلب التسليح التى تفى بالمواصفات القياسية المصرية م.ق.م. ٢٦٢ / ١٩٨٨ وتعديلاتها (أسياخ الصلب لتسليح الخرسانة وتعديلاتها) وفى حالة استعمال الشبك الملحوم تطبق المواصفات القياسية المصرية م.ق.م. ١٦١٨ / ١٩٩٠ (شبك أسياخ الصلب الملحومة لتسليح الخرسانة).

وللوقوف على أنواع صلب التسليح الغالب استخدامها والخواص الميكانيكية لها يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة وإلى المواصفات القياسية المصرية م.ق.م. ٧٦ / ١٩٦٩ وتعديلاتها (اختبار الشد للمعادن وتعديلاتها).

م-١-٤ صناعة خرسانة المنشآت المائية

للوقوف على الاحتياطات والشروط الواجب توافرها فى صناعة خرسانة المنشآت المائية من حيث رتبة الخرسانة والمقاومة المستهدفة وتصميم الخلطات الخرسانية وتأمين تحمل الخرسانة مع الزمن فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

م-١-٥ تأكيد وضبط الجودة لأعمال الخرسانة المسلحة للمنشآت المائية

بشأن مراقبة وضبط وتأكيد الجودة لأعمال الخرسانة المسلحة للمنشآت المائية من خلال توفير قدر كاف من الحيطة لضمان استخدام المواد وحسن استعمالها طبقا للمواصفات ومتطلبات التصميم وأصول الصناعة والتنفيذ بما يحقق استيفاء مستوى الأداء الواجب فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية المسلحة وبالنسبة للاختبارات الواجب إجراؤها على الخرسانة لضبط الجودة فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية وإلى المواصفات القياسية المصرية التالية :

م.ق.م. ١٦٥٨ طرق اختبار الخرسانة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٨ الجزء الأول : طريقة أخذ عينات الخرسانة الطازجة فى الموقع
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٩ الجزء الثانى : طريقة تعيين الهبوط للخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٨٩ الجزء الثالث : طريقة تعيين عامل الدمك للخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء الرابع : طريقة عمل أسطوانات الاختبار من الخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء الخامس : طريقة عمل مكعبات الاختبار من الخرسانة الطازجة
م.ق.م. ١٦٥٨ / ١٩٩١ الجزء السابع : طريقة المعالجة العادية لعينات الاختبار

م-١-٦ احتياطات تنفيذ خرسانة المنشآت المائية

للوقوف على احتياطات تنفيذ خرسانة المنشآت المائية من حيث استلام واعداد وتجهيز الموقع وتشوين المواد وتصميم واعداد وتركيب وفك الشدات والقوالب وخلط وصب ودمك ومعالجة الخرسانة وتشكيل صلب التسليح والحد الأدنى لغطاء الخرسانة والتفاوتات المسموح بها فى أعمال الخرسانة وإدارة التشييد فإنه يمكن الرجوع إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية.

م-١-٧ فواصل الصب والانكماش والتمدد لخرسانة المنشآت المائية

يمكن الرجوع بهذا الصدد إلى الكود المصرى لتصميم وتنفيذ المنشآت الخرسانية البند (٧-٤).